

Daniel Roberts a Dr Iestyn Pierce

**Dylunio
'Laser Tonfedd Ddeuol'**

Gwerddon

CYFNODOLYN ACADEMAIDD CYMRAEG

Golygydd: **Dr Anwen Jones**

Dylunio 'Laser Tonfedd Ddeuol'

Daniel Roberts a Dr Iestyn Pierce

I. Cyflwyniad

Mae ffynonellau tonnau di-dor (*continuous wave*) teraherts yn ddeniadol iawn ar gyfer nifer fawr o wahanol gymwysiadau, yn cynnwys sbectrosgopeg a synwryddion biofeddygol. Mae technoleg teraherts hefyd yn tyfu'n gyflym yn y maes meddygol, yn ogystal â'r maes diogelwch a monitro (Scheller et al., 2010; Saeedkia et al., 2005). Wrth ystyried cynhyrchu ymbelydredd teraherts effeithiol yn y 'bwllch teraherts' (0.3–10THz), rydym yn wynebu problem. Oherwydd nifer y cymwysiadau addawol, pwysig i donnau teraherts, mae'r broblem hon wedi denu sylw sylweddol dros y pymtheng mlynedd diwethaf (Kitaeva, 2008).

Mae laserau tonfedd ddeuol yn ofynnol ar gyfer nifer o gymwysiadau gwahanol, ac maent yn ffynonellau deniadol ar gyfer trawsnewid amledd aflinol am i lawr (*nonlinear frequency down-conversion*) ac ymyriadureg dwy donfedd (*two-wavelength interferometry*) (Leinonen et al., 2005).

Defnyddiwyd nifer o wahanol dulliau i arddangos laser tonfedd ddeuol. Mae'r dulliau hyn un ai'n defnyddio amrywiaeth o laserau lled-ddargludol â'r lleoliadau mwyhau wedi eu gwahanu'n gorfforol (Poguntke et al., 1993), gratinau allanol (*external gratings*) (Lin et al., 1998; Hidaka a Hatano, 1991), neu strwythur ceudodau cypledig, sydd un ai wedi cael ei bwmpio'n optegol neu'n drydanol (Pellandini et al., 1997; Badilita et al., 2004; Carlin et al., 1999; Grasso a Choquette, 2003; Geske et al., 2004).

Mae laser o fath VECSEL (*vertical-external-cavity surface-emitting laser*) yn ffynhonnell hyblyg iawn o ran creu ymbelydredd cydlynol llachar. Mae laserau o'r math hwn yn rhoi cyfuniad unigryw o nodweddion sydd prin yn hygyrch gyda laserau o fathau eraill, yn cynnwys y posibilrwydd o allyrru golau cydlynol, sy'n gweithredu fel laser, ar donfeddi sylfaenol yn cwmpasu ystod eang o donfeddi, o 670nm hyd at 2.35µm (Morozov a Morozov, 2013).

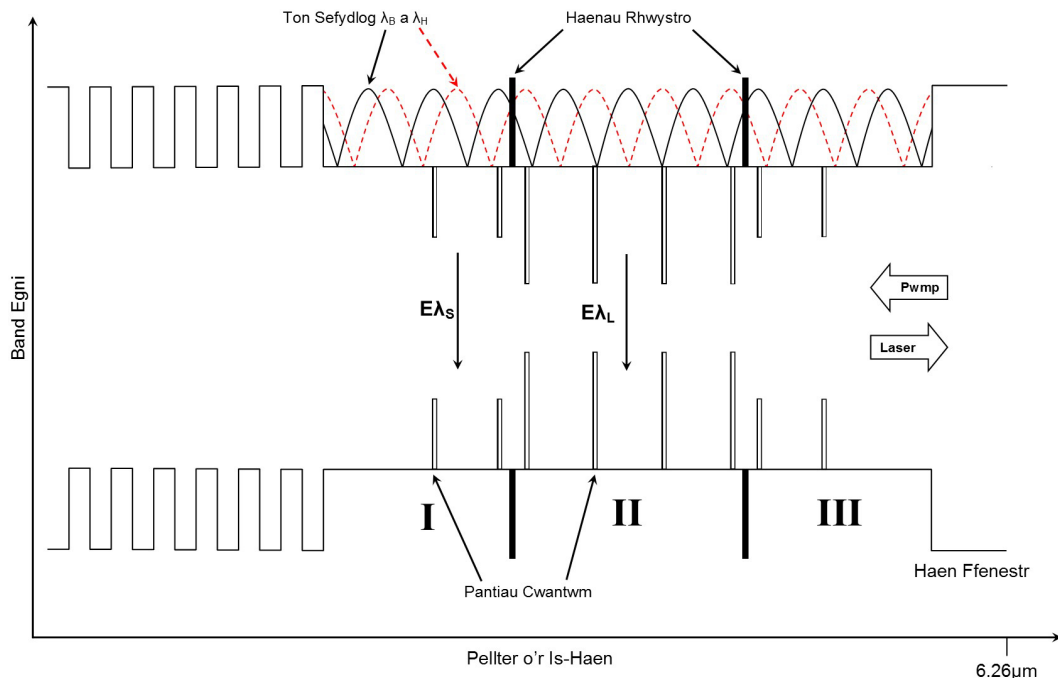
Ehangodd Leinonen et al. y posibiliadau hyn yn 2005 ar ôl iddynt arddangos VECSEL tonfedd ddeuol. Caiff y laser hwn ei bwmpio'n optegol ac mae'n cynnwys cyfres o bantiau cwantwm, heb fod yr union yr un fath, a roddir mewn strwythur cynnydd sengl. Cynhyrchwyd y pantiau cwantwm o InGaAs o wahanol gyfansoddiadau molar, sy'n cael eu disgrifio'n fanylach yn rhan II. Ers hynny, mae nifer o addasiadau wedi eu cynnig ar gyfer VECSEL sy'n allyrru golau ar ddwy donfedd wahanol yr un pryd (Fan et al., 2007; Pal et al., 2010; Hessenius et al., 2012.). Credir mai un o'r defnyddiau pwysicaf i'r laserau hyn yw cynhyrchu ymbelydredd gwahaniaeth-amledd (*difference-frequency radiation*) yng nghanol y sbectrwm isgoch hyd at yr ystod teraherts drwy drawsnewid amledd aflinol oddi mewn i geudod (*intracavity nonlinear frequency conversion*). Yn ddiweddar, llwyddodd Scheller et al. i arddangos ffynhonnell tonnau di-dor teraherts drwy gynhyrchu ymbelydredd gwahaniaeth-amledd oddi mewn i geudod yn y VECSEL tonfedd ddeuol yn seiliedig ar dull Fan et al. Llwyddodd i greu allyriad tonfedd ddeuol

gan ddefnyddio etalon o fewn y ceudod, ond lle nad oedd dyluniad y rhanbarth gweithredol (*active region*) yn ddim gwahanol i unrhyw VECSEL cyffredin (Morozov a Morozov, 2013).

II. Dyluniad y strwythur

Mae'r laser a gynigiwyd gan Leinonen et al. yn addas ar gyfer cynhyrchu amledd aflinol (*nonlinear-frequency generation*) yng nghanol yr amrediad tonfedd isgoch. Er bod strwythur cyffredinol y ddyfais yn nodweddiadol o unrhyw VECSEL, mae'r rhanbarth pantiau cwantwm wedi ei gynllunio'n arbennig ar gyfer gweithredu dwy donfedd. Mae ei rhanbarthau gweithredol felly yn cynnwys pantiau cwantwm o wahanol gyfansoddiadau molar o InGaAs, sy'n cynhyrchu dwy donfedd â gwahaniad eang o 58nm ($\lambda_B \approx 984nm$ a $\lambda_H \approx 1042nm$). Mae pob pant cwantwm yn 8nm o drwch.

Mae'r ddyfais hon, fel y gwelir yn Ffigur 1, yn cynnwys wyth pant cwantwm yn y rhanbarth gweithredol, wedi eu lleoli mewn tri man gwahanol. Cânt eu gwahanu gan rwystrau egni potensial uchel sydd wedi eu cynhyrchu o GaAs, sy'n gwasanaethu fel amsugnyddion ymbelydredd pwmp. Mae pedwar o'r pantiau cwantwm hyn wedi eu cynhyrchu o $In_{0.17}Ga_{0.83}As$, ac yn allyrru ar y donfedd fer, λ_B . Mae'r pedwar pant cwantwm hyn wedi eu lleoli yn y rhanbarth cyntaf a'r olaf (rhanbarthau I a III), â dau bant ym mhob rhanbarth, fel y gwelir yn Ffigur 1.



Ffigur 1: Diagram band egni o VECSEL fel ffwythiant o'r pellter oddi wrth yr is-haen, yn dangos dwy gydran ton unfan Fabry-Pérot, a lleoliad y pantiau cwantwm ar haenau rhwystro cludyddion (Leinonen et al., 2005: 2508)

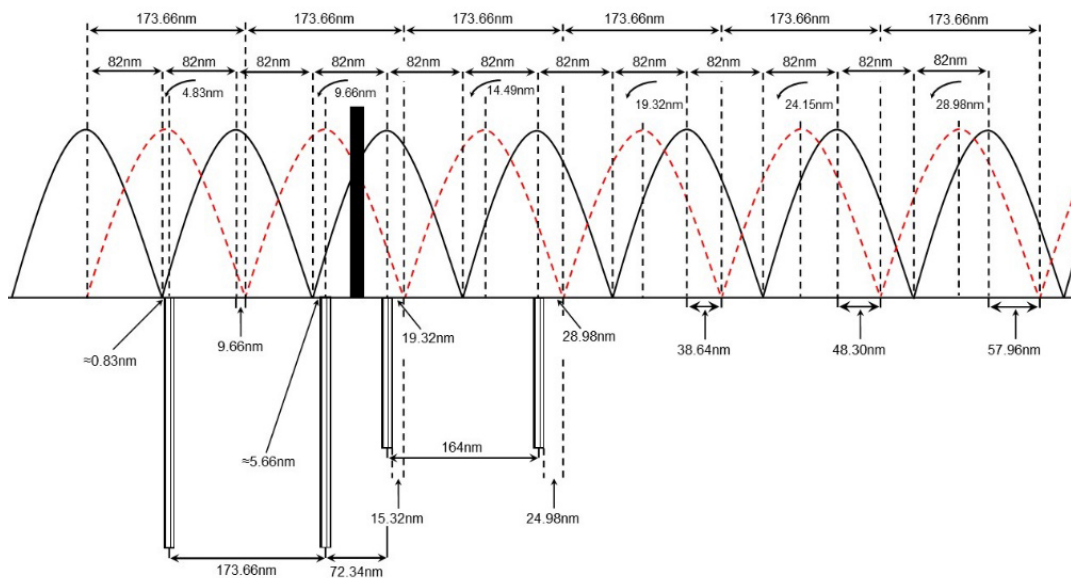
Mae pedwar pant cwantwm arall, a gynhyrchwyd o $\text{In}_{0.23}\text{Ga}_{0.77}\text{As}$, sy'n allyrru ar y donfedd hir, λ_H , wedi eu lleoli yn yr ail ranbarth (Rhanbarth II), fel y gwelir yn Ffigur 1. Mae'r pantiau yn y rhanbarth cyntaf a'r trydydd rhanbarth yn rhai bas, sy'n darparu cynnydd ar gyfer y donfedd fer, tra mae'r rhai yn yr ail ranbarth yn rhai dwfn, sy'n darparu cynnydd ar gyfer y donfedd hir. Mae'r rhanbarthau gweithredol yn cael eu gwahanu oddi wrth ei gilydd gan haenau rhwystro band canolig sydd wedi eu cynhyrchu o AIAs. Mae'r rhain yn atal cludiant trylediad o gludyddion a gynhyrchwyd gan y pwmp yn y rhanbarthau hyn. Mae'r rhwystrau yn bwysig gan mai un o nodweddion y laser hwn yw ei bod yn bosibl pwmpio'r tri rhanbarth sy'n cynnwys pantiau cwantwm ar wahân, yr un pryd. Mae'r rhwystrau hyn yn atal y cludyddion rhag llifo o'r pantiau cwantwm bas i'r pantiau cwantwm dwfn, ac felly'n cyfrannu at bwmpio optegol sydd bron yn hafal o'r pantiau cwantwm yn rhanbarthau I, II a III (Leinonen et al., 2005: 2509; Morozov a Morozov, 2013: 1702105-2).

Yn y strwythur hwn, mae'r pantiau cwantwm dwfn yn cael eu lleoli oddeutu nodau'r don unfan tonfedd fer (fel y gwelir o ddsbarthiad osgled y meysydd yn y rhanbarth gweithredol tonfedd hir yn Ffigur 1). Maent yn cael eu lleoli yma er mwyn darparu'r lefel leiaf posibl o amsugniad o'r donfedd fer yn y pantiau cwantwm dwfn. Mae'r pantiau cwantwm dwfn hefyd, wrth gwrs, wedi cael eu lleoli ar antinodau'r donfedd hir (Morozov a Morozov, 2013). Mae'r pantiau cwantwm sydd wedi eu lleoli yn rhanbarthau I a III wedi eu lleoli oddeutu antinodau'r donfedd fer, a hynny er mwyn gwneud y defnydd mwyaf posibl o'r cynnydd sydd ar gael (Leinonen et al. 2005). Mae'r adlewyrchiad o'r drych cynnydd yn cael ei ddarparu gan ddrych Bragg (DBR), lle y mae'r cyferbyniad rhwng indecsau plygiant yr haenau GaAs/AIAs yn ddigonol i sicrhau adlewyrchiad uchel yn y ddwy donfedd a gynhyrchir. Cyfanswm hyd y strwythur yw $6.26\mu\text{m}$, fel y gwelir yn Ffigur 1.

Cynlluniwyd y strwythur gan Leinonen et al. yn benodol i weithio ar donfedd hir o 1042nm , a thonfedd fer o 984nm , sy'n rhoi pellter mawr o 58nm rhwng y ddwy donfedd. Roedd y ddwy donfedd yn allyrru golau cydlynol, tonnau di-dor, hyd at bŵer pwmp o 2.4W , lle roedd nifer o linellau penodol i'w gweld yn y sbectrwm allyrru gan y ddwy donfedd. Mae Leinonen et al. yn nodi bod y laser yn gweithio'n effeithiol hyd at 2.4W o bŵer pwmp, ond ar ôl hyn mae'r laser yn dechrau dangos arwyddion hunanguriadol. Tybir gan Leinonen et al. fod yr hunanguriad yn cael ei achosi oherwydd newid-Q o'r gydran donfedd fer gan amsugniad gweddilliol yn y pantiau cwantwm dwfn, sydd heb eu lleoli yn berffaith ar nodau o batrwm sefydlog y donfedd fer (Leinonen et al., 2005: 2510), ac mae hyn i'w weld yn glir yn Ffigur 2. Mae Ffigur 2 yn dangos manylion strwythur y VECSEL yn Ffigur 1. Tybiwyd bod antinod y donfedd unfan fer yn cyfarfod nod y donfedd unfan hir yng nghanol y rhanbarth gweithredol tonfedd hir, h.y. rhwng y ddau bant dwfn. Dim ond ochr dde strwythur y VECSEL, o'r pwynt canolig hwn, yn cynnwys lleoliad yr haen rwystro fand-eang, a ddangosir yn Ffigur 2.

Yn Ffigur 2, gellir gweld yn glir nad yw'r pantiau cwantwm dwfn wedi cael eu lleoli'n berffaith ar nodau o batrwm sefydlog y donfedd fer. Wrth edrych ar y pant cwantwm dwfn cyntaf, gwelwn fod nod y donfedd fer tua 0.83nm o ochr y pant cwantwm, ac felly nad yw'n alinio yn unman ar y pant. Drwy edrych ar yr ail bant cwantwm dwfn, gwelwn fod nod y donfedd fer ymhellach eto o ochr y pant, tua 5.66nm o ochr y pant, ac eto felly ddim yn alinio arni yn unrhyw le.

Dylid nodi bod y pantiau cwantwm 173.66nm oddi wrth ei gilydd yn y rhanbarth gweithredol tonfedd hir, a 164nm oddi wrth ei gilydd yn y rhanbarth gweithredol tonfedd



Ffigur 2: Strwythur gan Leinonen et al. (2005) yn dangos lleoliad y pantiau cwantwm yn rhanbarthau II a III o'u cymharu â nodau ac antinodau'r donfedd fer (llinell solet ddu) a nodau ac antinodau'r donfedd hir (llinell doredig goch), a'r haen rwystro fand-eang

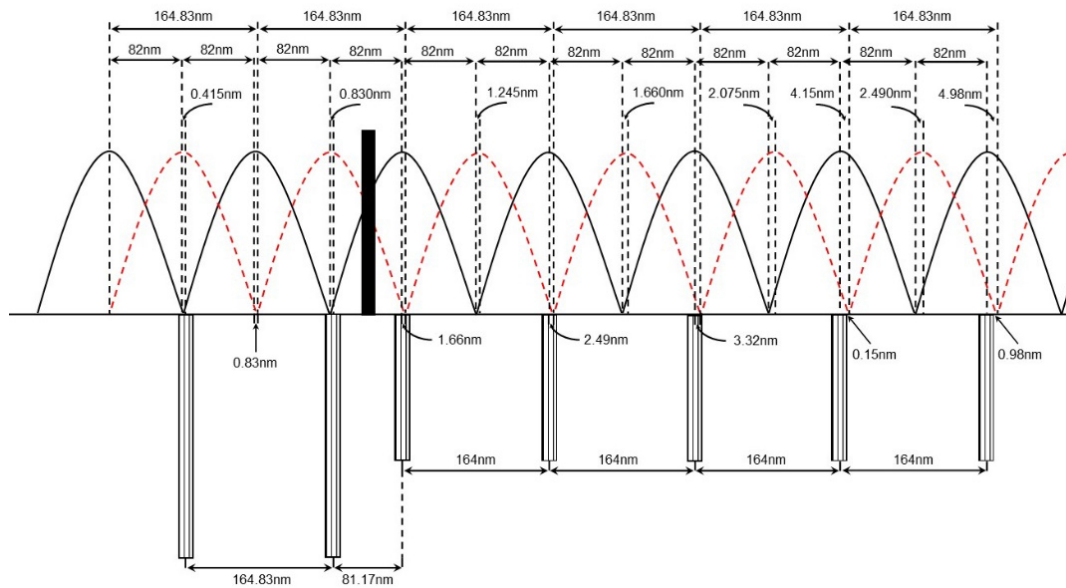
fer. Mae'r pantiau bob ochr i'r haen rwystro yn 72.34nm oddi wrth ei gilydd, ac mae'n amlwg felly nad yw'r pantiau cwantwm dwfn wedi eu lleoli'n berffaith ar nodau patrwm sefydlog y donfedd fer.

III. Y strwythur a ddyluniwyd

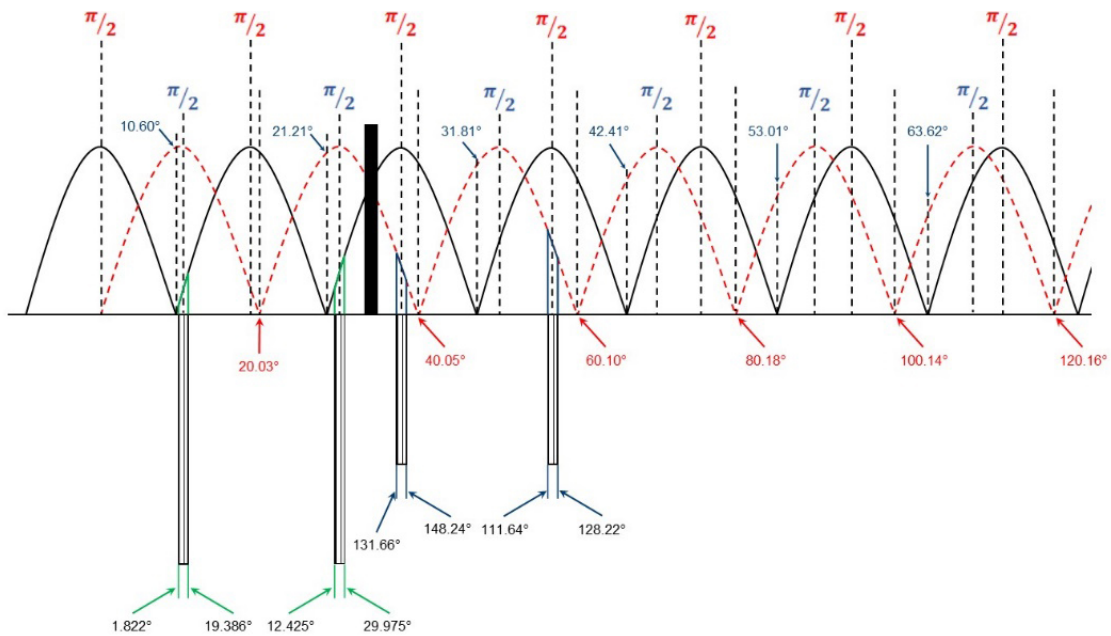
Arweiniodd hyn at geisio gwneud y pellter rhwng y donfedd hir a'r donfedd fer yn llawer llai er mwyn ceisio gwella perfformiad y VECSEL, fel bod nodau'r donfedd fer yn alinio â'r pantiau cwantwm dwfn. O ganlyniad, bydd yr effaith hunanguriadol yn cael ei leihau drwy leihau'r posibilrwydd o amsugniad gweddillol yn y pantiau cwantwm dwfn. Mae'r lleihad yn y pellter rhwng y donfedd fer a'r donfedd hir i'w weld yn Ffigur 3.

Ar gyfer dyluniad y VECSEL hwn, mae'r donfedd fer yr un fath ag yn y strwythur blaenorol ar 984nm, ond y tro hwn mae'r donfedd hir wedi cael ei lleihau i 989nm, i roi gwahaniaeth rhwng y ddwy donfedd o 5nm, o'i gymharu â 58nm. Dylid nodi hefyd fod hyd y strwythur yn cael ei gadw'r un fath, sef 6.26µm.

Drwy edrych ar y pant dwfn cyntaf yn Ffigur 3, gwelwn fod nod y donfedd fer, ac antinod y donfedd hir, yn alinio ar y pant, gyda gwahaniaeth o 0.415nm yn unig rhwng y ddau. Drwy edrych yn awr ar yr ail bant cwantwm dwfn, gwelwn eto fod nod y donfedd fer ac antinod y donfedd hir yn alinio ar y pant, ond y tro hwn gyda gwahaniaeth o 0.830nm rhyngddynt. Gellir nodi yn y rhanbarth gweithredol tonfedd fer (i'r dde o'r haen rwystro) fod antinod y donfedd fer a nod y donfedd hir yn alinio ar y pantiau cwantwm bas hyd at y pedwarydd pant, lle y mae nod y donfedd hir 0.15nm o ochr y pant hwnnw. Mae'r pantiau yn y rhanbarth gweithredol tonfedd hir 164.83nm oddi wrth ei gilydd, a'r pantiau yn y rhanbarth gweithredol tonfedd fer eto yn 164nm oddi wrth ei gilydd. Mae'r pantiau bob ochr i'r haen rwystro 81.17nm oddi wrth ei gilydd, sydd yn 8.83nm yn fwy nag yn y strwythur gan Leinonen et al.



Ffigur 3: Strwythur a ddyluniwyd yn dangos lleoliad y pantiau cwantwm yn rhanbarthau II a III o'u cymharu â nodau ac antinodau'r donfedd fer (llinell solet ddu) a nodau ac antinodau'r donfedd hir (llinell doredig goch), a'r haen rwystro fand-eang



Ffigur 4: Strwythur gan Leinonen et al. yn dangos yr ongl wedd ar gyfer nodau ac antinodau'r donfedd fer (llinell solet ddu) a'r donfedd hir (llinell doredig goch) a'r pantiau cwantwm yn rhanbarthau II a III

IV. Anghysondeb

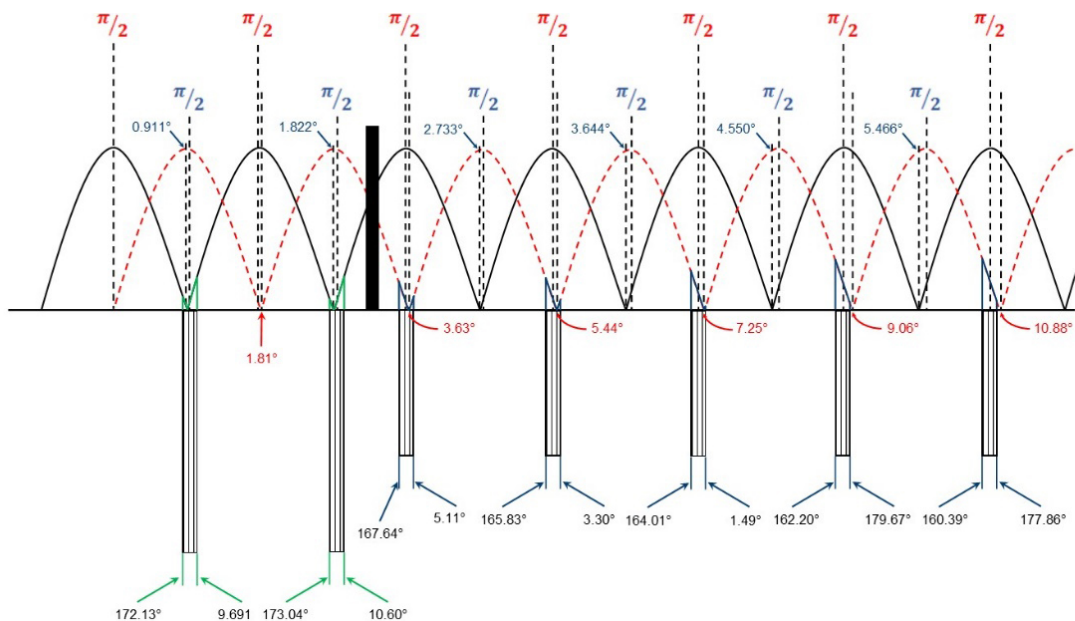
Ar gyfer y ddau strwythur, mae'n bwysig gwybod beth yw'r anghysondeb rhwng y donfedd hir, y donfedd fer a'r pantiau cwantwm. Felly, rhaid gwybod beth yw maint yr ongl wedd (*phase angle*) rhwng nodau ac antinodau'r ddwy donfedd, ac yna ar ba onglau y mae'r pantiau cwantwm dwfn yn cyfarfod y donfedd fer yn y rhanbarth gweithredol tonfedd hir, ac ar ba onglau y mae'r pantiau cwantwm bas yn cyfarfod y donfedd hir yn y rhanbarth gweithredol tonfedd fer. O hyn, mae'n bosibl cyfrifo'r integryn gorgyffyrddiad ar gyfer pob pant cwantwm. Mae Ffigur 4 yn dangos yr onglau wedi eu cyfrifo ar gyfer y strwythur gan Leinonen et al.

Cyfrifwyd yr onglau yn Ffigur 4 gan ddefnyddio'r fformiwla:

$$f(x) = \sin(k_{B,H}x + \varphi) \quad (1)$$

Ile mai $k_{B,H}$ yw'r cysonyn lluosogi ar gyfer y donfedd fer a'r donfedd hir, a ddiffinnir fel $2\pi / \lambda_{B,H}$, x yw'r lleoliad llorweddol (mewn metrau), a φ yw'r cysonyn gwedd. I gael yr ongl, rhaid ailysgrifennu'r fformiwla ar gyfer φ .

Ar gyfer y pantiau cwantwm dwfn, rhaid yn gyntaf gyfrifo pa mor bell o nod y donfedd unfan fer y mae pob ochr i'r pant. Ar gyfer y pant cwantwm dwfn cyntaf, mae'r ochr chwith, a ddiffinnir fel x_2 , yn cael ei mesur fel 0.83nm o nod y donfedd unfan fer (gweler Ffigur 2), a chan fod y pantiau yn 8nm o drwch, mae'r ochr dde, a ddiffinnir fel x_1 , yn cael ei mesur fel 8.83nm o nod y donfedd unfan fer. Drwy ddefnyddio'r dull blaenorol, cyfrifwyd y cysonyn gwedd ar gyfer x_2 fel $\varphi_1 = -1.82^\circ$ a chyfrifwyd x_1 fel $\varphi_2 = -19.39^\circ$. Cyfrifwyd yr onglau ar gyfer y pantiau cwantwm bas yn yr un modd, ond y tro hwn mae'r pellter ar gyfer ochrau'r pantiau yn cael ei gyfrifo o nod y donfedd unfan hir.



Ffigur 5: Strwythur a ddyluniwyd yn dangos yr ongl wedd ar gyfer nodau ac antinodau'r donfedd fer (llinell solet ddu) a'r donfedd hir (llinell doredig goch) a'r pantiau cwantwm yn rhanbarthau II a III

Mae cyfrifo'r integryn gorgyffyrddiad yn rhan bwysig o'r dadansoddiad hwn. Diffinnir yr integryn gorgyffyrddiad cyntaf fel cymhareb gorgyffyrddiad y donfedd fer sy'n alinio â'r pantiau cwantwm dwfn yn y rhanbarth gweithredol tonfedd hir (o'i gymharu â'r gorgyffyrddiad cyfan lle mae'r pantiau cwantwm dwfn wedi eu halinio ag antinodau'r patrwm sefydlog tonfedd hir). Diffinnir yr ail integryn gorgyffyrddiad fel cymhareb gorgyffyrddiad y donfedd hir sy'n alinio â'r pantiau cwantwm bas yn y rhanbarth gweithredol tonfedd fer (eto o'i gymharu â'r gorgyffyrddiad cyfan lle y mae'r pantiau cwantwm bas wedi eu halinio ag antinodau'r patrwm sefydlog tonfedd fer).

Diffinnir yr integryn gorgyffyrddiad fel:

$$\text{Gorgyffyrddiad, } a = \frac{\int_{\varphi_2/k_B}^{\varphi_1/k_B} \cos(k_B x - \Phi) dx}{\int_{-\varphi/k_H}^{\varphi/k_H} \cos(k_H x) dx} \quad (2)$$

Cyfrifwyd yr integryn gorgyffyrddiad cyfan ar gyfer y strwythur VECSEL gwreiddiol fel 0.28840 ar gyfer y pantiau cwantwm dwfn, a 0.30530 ar gyfer y pantiau cwantwm bas. Ar gyfer y strwythur a ddyluniwyd yn Ffigur 5, mae'r integryn gorgyffyrddiad cyfan ar gyfer y pantiau cwantwm dwfn yn wahanol i un strwythur Leinonen et al. oherwydd y lleihad yn y donfedd hir o 1042nm i 989nm. Mae'r integryn gorgyffyrddiad cyfan ar gyfer y strwythur VECSEL newydd yn cael ei gyfrifo fel 0.30382.

Dengys y tablau canlynol y gwahaniaeth mewn gorgyffyrddiad rhwng pob pant cwantwm yn y strwythur VECSEL gwreiddiol a'r un sydd wedi ei ailddylunio. O'r tablau hyn, gellir gweld yn glir fod gorgyffyrddiadau'r pantiau cwantwm yn y strwythur a ddyluniwyd yn llawer llai nag yn y strwythur gwreiddiol. Mae'r canrannau hefyd yn llawer llai, gyda'r ganran isaf yn y strwythur gwreiddiol yn 19.45%, tra bo'r ganran uchaf yn y strwythur newydd yn 18.768% yn unig. Y canrannau pwysig yw'r rhai yn y pantiau cwantwm dwfn, lle y mae'r strwythur newydd yn dangos gwelliant yn yr amsugniad o 40%. Felly, mae'r strwythur a ddyluniwyd yn dangos arwyddion o fod yn cynnwys llai o anghysondeb rhwng y donfedd hir, y donfedd fer a'r pantiau cwantwm.

Yr effaith y bydd yn rhaid bod yn ofalus ag ef yn ymarferol yw ehangiad lled y llinell (*linewidth broadening*), lle y bydd y laser yn allyrru tonfedd ag un brig llydan yn y sbectrwm, a gall fod yn broblem pan fo dwy donfedd yn agos iawn at ei gilydd (5nm yn yr achos hwn).

Strwythur Leinonen et al.:

Pant cwantwm	Gorgyffyrddiad	Fel canran
Dwfn 1	0.0561	19.45
Dwfn 2	0.1103	38.25
Bas 1	0.1853	60.69
Bas 2	0.2505	82.05

Tabl 1: Tabl yn dangos yr integryn gorgyffyrddiad ar gyfer pob pant cwantwm, ac yna fel canran ar gyfer y strwythur gan Leinonen et al.

Y strwythur a ddyluniwyd:

Pant cwantwm	Gorgyffyrddiad	Fel canran
Dwfn 1	0.0465	15.305
Dwfn 2	0.0465	15.305
Bas 1	0.0492	16.115
Bas 2	0.0492	16.115
Bas 3	0.0492	16.115
Bas 4	0.0478	15.657
Bas 5	0.0573	18.768

Tabl 2: Tabl yn dangos yr integryn gorgyffyrddiad ar gyfer pob pant cwantwm, ac yna fel canran o 100% ar gyfer y strwythur a ddyluniwyd

V. Ehangiad lled llinell

Pan fo laser yn gweithredu o dan amodau cyflwr sefydlog (*steady-state conditions*), tybir bod dwyseddau'r cludyddion a'r ffotonau'n aros yn gyson. Yn ddamcaniaethol, mae'r dybiaeth hon yn gywir, ond, yn ymarferol, nid yw hyn yn hollol gywir. Mewn gwirionedd, gallwn weld bod y broses o ailgyfuno a chynhyrchu'r cludyddion a'r ffotonau yn digwydd ar hap. Arweinia hyn at newidiadau enydaidd amrywiol mewn amser yn nwyseddau'r cludyddion a'r ffotonau. Mae'r effaith hon i'w gweld hyd yn oed pan nad oes dim cerrynt yn cael ei gymhwyso i'r laser. Fel canlyniad, mae amrywiadau yn nwysedd y ffotonau yn ymddangosol, gan arwain at amrywiaeth yn maint y pŵer allbwn, sydd o ganlyniad yn darparu llawr sŵn (*noise floor*). Bydd amrywiaeth yn nwysedd y cludyddion hefyd yn ymddangos, gan arwain at amrywiaeth yn y donfedd allbwn. O ganlyniad, cynhyrchir lled llinell sbectrol cyfyngedig ar gyfer y modd lasyrru (*lasing mode*) (Coldren a Corzine, 1995).

Pan fydd y laser yn weithredol, bydd yn cynhyrchu sŵn arddwysedd (*intensity noise*) a sŵn amledd (*frequency noise*). Gall y rhain effeithio ar y sbectrwm lasyrru (*lasing*) o'r laser. Pe byddai'r laser yn cynnwys un modd sy'n gweithredu fel laser (megis laserau adborthi dosranedig (*distributed feedback (DFB)*) yn unig ac adlewyrchydd dosranedig Bragg (*distributed Bragg reflector (DBR)*), yna byddai'r lled sbectrol o allbwn y laser yn cael ei leihau hyd at un 'modd'. Er hynny, bydd lled y llinell yn y math hwn o laser yn dal yn gyfyngedig oherwydd effaith sŵn laser (*laser noise*). Os na chymerir gofal, bydd arbrofion yn dangos bod lled llinell nodweddiadol o ddeudodau laser yn fwy na megaherts. Nid yw hyn yn ddelfrydol ar gyfer cymwysiadau yn cynnwys synwryddion neu systemau cyfathrebu sy'n defnyddio canfod cydlynol, lle y mae'n addawol iawn cael lled llinell sy'n llawer llai na megaherts. Fel canlyniad, mae'n bwysig iawn deall lled llinell cynhenid laserau deuod (Coldren a Corzine, 1995).

VI. Lled llinell Schawlow–Townes a Charles Henry

Anwadaliadau (*fluctuations*) yng ngwedd allbwn maes optegol y laser sy'n achosi lled llinell laser. Mae'r anwadaliadau hyn yn ganlyniad un ai allyriad digymell (*spontaneous emission*) neu newidiadau yn nwysedd y cludyddion (Coldren a Corzine, 1995; Henry, 1982; Yu, 2003; Osinski a Buus, 1987; Zhao et al., 1993). Mae allyriad digymell yn gynhenid ym mhob laser ac yn cael ei achosi o ganlyniad i ychwanegiad ar hap o ffotonau sy'n allyrru'n ddigymell i'r 'modd' cyseinol lled-gydlynol. Mewn deuodau laser yn unig mae'r amrywiaeth yn nwysedd y cludyddion o bwysigrwydd arwyddocaol. Mae'n cael ei achosi o ganlyniad i'r cyfranoled (proportionality) rhwng ΔN ac $\Delta \nu$ sydd yn cael ei nodweddu gan y syfriad amledd (*frequency shift*) mewn ymateb i newidiadau yn nwysedd y cludyddion (Coldren a Corzine, 1995; Henry, 1982):

$$\Delta \nu = \frac{\alpha}{4\pi} \Gamma v_g a \Delta N \quad (3)$$

Ile y diffinnir $\Delta \nu$ fel lled y llinell, Γ fel y ffactor cyfyngu (*confinement factor*), v_g fel cyflymder grŵp (*group velocity*), a fel y cynnydd differol (*differential gain*) ac ΔN fel dwysedd y cludyddion. Yn yr hafaliad uchod, α yw ffactor mwyhau lled y llinell (neu ffactor alffa Henry, α_H). Mae'r cysonyn cyfranoled yn cynnwys y ffactor mwyhau lled llinell gan fod y cynnydd, a'r indecs plygiant, yn dibynnu'n uniongyrchol ar ddwysedd y cludyddion. Diffinia'r ffactor mwyhau lled llinell y berthynas rhwng y modd y mae'r indecsau real a dychmygol yn cael eu heffeithio gan ddwysedd y cludyddion, sef (Henry, 1982; Yu, 2003; Coldren a Corzine, 1995):

$$\alpha = \frac{\Delta n'}{\Delta n''} = -\frac{dn/dN}{dn_i/dN} = -\frac{4\pi dn/dN}{\lambda dg/dN} = -\frac{4\pi dn}{\lambda a dN} \quad (4)$$

Mae'r ffactor mwyhau lled llinell, α , yn baramedr deunydd, ac mae ei werth yn dibynnu ar amledd y laser, a hefyd ar grynodiad trothwy cludyddion y laser. Wrth edrych ar ochr dde hafaliad (4), mae'r rhifiadur a'r enwadur yn cynrychioli'r indecs plygiant differol ar gynydd, ac mae'r rhain mewn perthynas â chrynodiad o gludyddion o fewn ceudod y laser (Yu, 2003). Mewn laserau lled-ddargludol, mae'n ddymunol lleihau ffactor mwyhau lled y llinell hyd at sero. O ganlyniad, byddai'r lled llinell dilynol o'r sbectrwm lasyrnu (*lasing*) yn cael ei leiafu. Mae'r ffactor hwn yn sylfaenol bwysig mewn laserau lled-ddargludol gan ei fod yn chwarae rhan allweddol mewn darganfod lled llinell y maes, nodweddion trydarol (*chirping characteristics*), ac mewn unrhyw ymgais i geisio rheoli'r nodweddion hyn. Dylid nodi ei fod yn dibynnu'n gryf ar donfedd, ac adlewyrchir hyn yn siâp y sbectrwm yn y cynnydd differol (Yu, 2003).

Cafodd y model damcaniaethol cyntaf ar gyfer lled llinell laser ei ddatblygu gan Schawlow a Townes yn 1958 cyn i'r laser cyntaf hyd yn oed gael ei arddangos yn arbrofol (Schawlow a Townes, 1958). Cyfrifodd Schawlow a Townes y terfyn sylfaenol (cwantwm) ar gyfer lled llinell mewn cydweddiad â lled llinell masersau. Mae'r egni sy'n cael ei allyrru fel allbwn o fath maser fel arfer yn don fonocromatig iawn. Mae hyn oherwydd bod yr egni sy'n cael ei greu drwy allyriad ysgogedig (*stimulated emission*) yn llawer mwy na'r egni sy'n cael ei greu gan allyriad digymell. Mae'r amrediad amledd lle y gellir dosbarthu egni sylweddol yn cael ei ddiffinio gan y fformiwla ganlynol, sef fformiwla enwog Schawlow–Townes (Schawlow a Townes, 1958; Paschotta, 2008):

$$\Delta v_{laser} = \frac{4\pi h\nu (\Delta v_c)^2}{P_{allan}} \quad (5)$$

Ile ddiffinnir $h\nu$ fel egni'r ffoton; Δv_c yw hanner lled ar hanner macsimwm (*half-width at half-maximum – HWHM*) lled band y cyseinydd, a P_{allan} yw'r pŵer allbwn. Yn neilliant yr hafaliad uchod, tybir nad oes colledion ceudod parasitig (Paschotta, 2008). Wrth ddatblygu'r hafaliad, defnyddiodd Schawlow a Townes y dybiaeth fod amrywiaethau yng ngwedd y maes optegol. Drwy hynny, llwyddant i esbonio ffenomenau lled llinell mewn laserau nwy (*gas lasers*) (Yariv, 1989), megis siâp Lorentzaidd sbectrwm lled llinell, a hefyd y berthynas wrthdro rhwng Δv a'r pŵer allbwn o laserau (Yu, 2003; Coldren a Corzine, 1995).

Mae'r hafaliad canlynol (Coldren a Corzine, 1995) yn mynegi lled llinell lled llawn ar hanner macsimwm (*full-width half maximum – FWHM*) gyredig fel:

$$\Delta v_{digym} = \frac{1}{2\pi\tau'_p} = \frac{\Gamma R'_{sp}}{2\pi N_p} \quad (\text{Digymell yn unig}) \quad (6)$$

Mae'r hafaliad uchod yn hafal i hafaliad enwog Schawlow–Townes (Schawlow a Townes, 1958; Paschotta, 2008). O hafaliad (6) mae'n bosibl dod i'r casgliad y bydd lled y llinell yn amrywio mewn cymhareb wrthdro â dwysedd y ffotonau, neu â'r pŵer allbwn. Gan fod dwysedd ffotonau yn gallu cynyddu'n sylweddol mewn laser, gall lled llinell y laser, o ganlyniad, fynd yn hynod gul, ac mae hyn, wrth gwrs, yn un o nodweddion laser (Coldren a Corzine, 1995).

Mae rhai diffygion yn hafaliad enwog Schawlow–Townes; mae'n rhoi enrhifiad manwl gywir y lled llinell dan y trothwy, ac felly mae'n gywir ar gyfer problemau allyriad digymell wedi'i fwyhau. Ond wrth ystyried laser sy'n gweithredu uwchben y trothwy, mae'r cyplu aflinol rhwng yr hafaliadau cyfradd yn darostwng un o ddwy gydran pedrongledd y sŵn (mae'r anwadaliadau ym maes osgled yn sefydlogi uwchben y trothwy) (Coldren a Corzine, 1995). Arweinia'r effaith hwn at ostyngiad o ffactor o ddau yn lled y llinell sy'n dod o waith Schawlow a Townes. Cafodd y gostyngiad yma ei gywiro gan Melvin Lax yn 1967 (Lax, 1967). Drwy ychwanegu ffactor cywiro o $\frac{1}{2}$, a thrwy drawsnewid y gwerthoedd yn hafaliad (5) yn werthoedd lled llawn ar hanner macsimwm (yn hytrach na hanner lled ar hanner macsimwm), lluniwyd hafaliad lled llinell addasedig Schawlow–Townes:

$$\Delta v_{laser} = \frac{\pi h\nu (\Delta v_c)^2}{P_{allan}} = \frac{\Gamma R'_{sp}}{4\pi N_p} \quad (7)$$

Erys rhai diffygion o hyd gyda'r hafaliad addasedig gan fod hafaliad (7) yn ystyried y sŵn o allyriad digymell yn unig, ac felly ddim yn cynnwys sŵn cludyddion (Coldren a Corzine, 1995). Hefyd, mae hafaliad Schawlow–Townes wedi amcangyfrif Δv yn rhy isel ar gyfer laserau lled-ddargludol ffactor 30. Mae hyn oherwydd yr anallu i amgyffred yr amrywiaeth yn yr indecs plygiant gyda'r crynodiad cludyddion tu mewn i'r deunyddiau lled-ddargludol (Henry, 1982; Yu, 2003; Osinski a Buus, 1987). Mae'r amrediad hwn yn yr indecs plygiant yn ganlyniad i'r allyriad digymell sy'n achosi newid yng ngwedd ac arddwysedd maes y laser.

Pan mae'r laser yn weithredol, mae'n gorfod dychwelyd i'w gyflwr sefydlog, ac o ganlyniad, mae darn dychmygol yr indecs plygiant yn newid. Yn ychwanegol at y newidiadau hyn, bydd darn real yr indecs plygiant yn newid, a bydd hyn yn creu amrywiaeth gwedd ychwanegol, ac oddi yma yn ehangu lled llinell y laser. Er mwyn cymryd i ystyriaeth y cludyddion sy'n dylanwadu ar y newid yn yr indecs plygiant, rhaid cynnwys ffactor mwyhau lled llinell ar gyfer lled llinell laser (Yu, 2003; Coldren a Corzine, 1995).

Drwy gyfeirio yn ôl at yr hafaliad a gafwyd ar gyfer y ffactor mwyhau lled llinell (2), mae'n glir ei fod yn dibynnu'n bennaf ar briodweddau ffisegol deunyddiau laser, ac felly mynegir yr hafaliad lled llinell laser addasedig, $\Delta\nu$, fel (Coldren a Corzine, 1995: tt. 240–41):

$$\Delta\nu = \Delta\nu_{ST}(1 + \alpha^2) = \frac{\Gamma R'_{sp}}{4\pi N_p}(1 + \alpha^2) \quad (8)$$

Yn yr hafaliad uchod, $\Delta\nu_{ST}$ yw hafaliad addasedig Schawlow–Townes (hafaliad (7)) a ddiffiniwyd gan Charles Henry yn 1982; mae'n cael ei fwyhau gan $1 + \alpha^2$ mewn laserau lled-ddargludol, a dyma arweiniodd at enwi α fel ffactor mwyhau lled llinell (Henry, 1982; Henry, 1983).

Diffinia Charles Henry led llinell laser fel:

$$\Delta f = \frac{v_g^2 h\nu g n_{sp} \alpha_m (1 + \alpha^2)}{8\pi P_{allan}} \quad (9)$$

Ile diffinnir v_g fel y cyflymder grŵp (*group velocity*); $h\nu$ yw egni'r ffoton, g yw'r cynnydd, n_{sp} yw'r ffactor allyriad digymell (*spontaneous emission factor*), α_m yw'r colledion ffased (*facet loss*) (neu ddsraniad colledion drych), α yw ffactor mwyhau lled llinell a P_{allan} yw'r pŵer allbwn am bob ffased. Gellir canfod tarddiad manwl lled llinell Henry o fewn y papur gan Charles Henry (1982). Yn y mwyhad, $1 + \alpha^2$, mae'r '1' yn cynrychioli sŵn allyriad digymell, ac mae'r ' α^2 ' yn cynrychioli cyfraniad sŵn cludyddion tuag at led llinell (Coldren a Corzine, 1995: t. 241).

Mae lled llinell damcaniaethol ar gyfer VCSEL yn cael ei roi gan yr un mynegiad â laserau sy'n ymyl-allyrru.

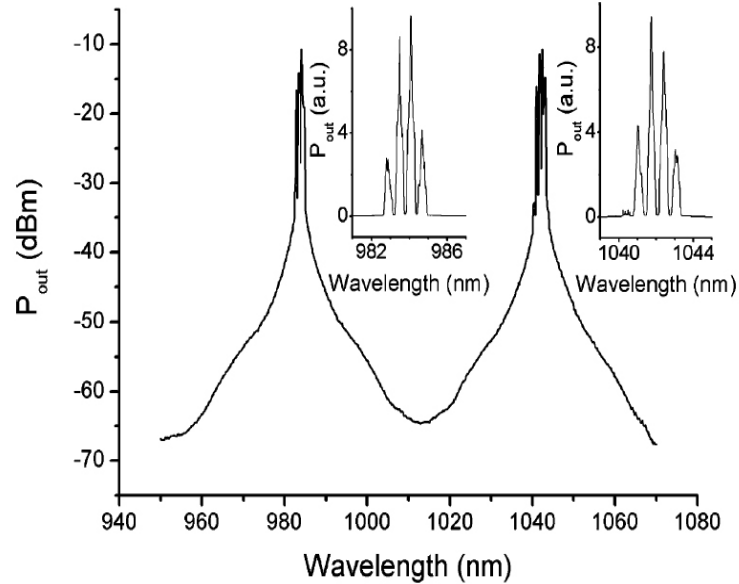
Mae hafaliad (8) yn darparu'r lled llinell lled llawn ar hanner macsimwm ar gyfer laserau sy'n ymyl allyrru, a gellir cymhwyso'r un hafaliad ar gyfer laserau o'r math VCSEL (Wilmsen et al., 1999).

VII. Lled llinell y ddau strwythur

Gellir cyfrifo'r lled llinell ar gyfer y strwythur gan Leinonen et al. drwy ddadansoddi ei sbectrwm lasyrru (*lasing*), fel y dangosir yn Ffigur 6. O Ffigur 6, gwelir bod y tonfeddi canolog (*centre wavelengths*) yn 984nm a 1042nm ar gyfer y tonfeddi byr a hir. Drwy ddadansoddi eu sbectrwm, cyfrifwyd lled llinell y donfedd fer i fod tua 440GHz, a chyfrifwyd y donfedd hir i fod tua 470GHz.

Drwy edrych ar y mewnosodiadau o Ffigur 6 sydd yn dangos y sbectra ar raddfa linol, mae'r lled llinell ar gyfer y donfedd hir yn cael ei gyfrifo i fod tua 52.67GHz, ac mae'r lled

llinell ar gyfer y donfedd fer yn cael ei gyfrifo i fod tua 49.7GHz. Tybiwyd mai'r lled llinell ar raddfa linol yw'r mwyaf cywir yma gan fod y ddau led llinell mwy (440GHz a 470GHz) wedi eu cymryd o fesuriadau sbectrwm ffoto-ymoleuedd (*photo-luminescence*).



Ffigur 6: Sbectrwm lasyrru ('lasing') o strwythur Leinonen et al. (2005) wedi ei fesur gyda 2.4W o bŵer pwmp. Mae'r ddau fewnosodiad yn dangos y sbectra ar raddfa linol.

Ar gyfer dadansoddiad damcaniaethol o'r ddau strwythur, adeiladwyd model o VCSEL yn seiliedig ar hafaliadau cyfradd (*rate equations*) y cludyddion a'r ffotonau (Coldren a Corzine, 1995). I efelychu laser tonfedd ddeuol, cafodd golau ei gyplu o'r donfedd fer i'r donfedd hir drwy ddefnyddio'r canranau gorgyffyrddiad a gyfrifwyd yn flaenorol. Diffinnir yr hafaliadau cyfradd ar gyfer y cludyddion a'r ffotonau fel:¹

$$\frac{dN}{dt} = \frac{\eta_i I}{qV} - (R_{sp} + R_{nr}) - v_g g N_p \quad (10)$$

$$\frac{dN_p}{dt} = \left[\Gamma v_g g - \frac{1}{\tau_p} \right] N_p + \Gamma R'_{sp} \quad (11)$$

Ile mae N yn ddwysedd y cludyddion; N_p yw dwysedd y ffotonau, η_i yw'r effeithlonedd cwantwm mewnol (*internal quantum efficiency*), I yw'r cerrynt cymhwysol, q yw gwefr yr electronau, V yw cyfaint y rhanbarth gweithredol, R_{sp} yw'r gyfradd ailgyfuno ddigymell, R_{nr} yw'r gyfradd ailgyfuno amhelydrol (*nonradiative*), v_g yw'r cyflymder grŵp, g yw'r cynnydd, Γ yw'r ffactor cyfyngu, τ_p yw hyd oes ffoton ac R'_{sp} yw'r gyfradd allyrru digymell am bob uned cyfaint gweithredol mewn un modd optegol.

Mae'r gwerthoedd a ddefnyddiwyd ar gyfer y paramedrau yn y model FORTRAN yn seiliedig ar y rhestr o bamedrau cyffredin ar gyfer strwythurau laser yn y gyfrol *Diode Lasers and Photonic Integrated Circuits* gan Larry A. Coldren a Scott W. Corzine (1995). Mae tabl 3 yn rhestru'r paramedrau, a'u gwerthoedd, a ddefnyddiwyd ar gyfer y model VCSEL.

¹ Coldren a Corzine, 1995: t. 187.

Paramedr	Gwerth
Cyfaint y Rhanbarth Gweithredol, V	$2.4 \times 10^{-12} \text{ cm}^3$
Cyflymder Grŵp, v_g	$3 \times 10^{10} \text{ cm/e}$
Ffactor Cyfyngu, β	0.05
Cerrynt Chwistrellu, I	0.5 mA
Effeithlonedd Cwantwm Mewnol, η_i	0.8
Hyd Oes Ffoton, τ_p	$2.20 \times 10^{-12} \text{ ps}$
Ffactor Allyriad Digymell, β_{sp}	2×10^{-4}

Tabl 3: Crynodeb o'r paramedrau a ddefnyddiwyd ar gyfer y model o VCSEL (Coldren a Corzine, 1995)

Ar gyfer pob efelychiad o'r strwythur VCSEL gan Leinonen et al. a'r VCSEL sydd wedi ei ailddylunio, cedwir lefel y pwmpio yn gyson ar 0.5mA ar gyfer pob cysonyn cypledig. Mae'r canlyniadau o'r efelychiad ar gyfer y strwythur gan Leinonen et al. yn dangos, ar gyfer y donfedd fer, fod cyflwr sefydlog dwyseddau'r cludyddion a'r ffotonau yn aros yn gyson ar gyfer pob gwerth o'r cysonyn cypledig a ddefnyddiwyd. Mae hyn yn ddisgwyliedig gan nad oedd unrhyw olau yn cael ei gyplu i mewn i'r donfedd fer. Ar gyfer y donfedd hir, wrth i werthoedd y cysonion cypledig gynyddu, roedd y gwerthoedd cyflwr sefydlog ar gyfer dwysedd y ffotonau yn cynyddu'n raddol. O ganlyniad, roedd gwerthoedd cyflwr sefydlog dwysedd y cludyddion yn lleihau'n raddol i gymryd i ystyriaeth y cynnydd yn nwysedd y ffotonau. Mae tabl 4 yn crynhoi'r canlyniadau hyn.

CC (%)	Tonfedd Fer		Tonfedd Hir	
	Dwysedd Cludyddion	Dwysedd Ffotonau	Dwysedd Cludyddion	Dwysedd Ffotonau
19.45	2.537×10^{18}	6.653×10^{13}	2.425×10^{18}	7.261×10^{13}
38.25	2.537×10^{18}	6.653×10^{13}	2.353×10^{18}	7.643×10^{13}
60.69	2.537×10^{18}	6.653×10^{13}	2.289×10^{18}	7.969×10^{13}
82.05	2.537×10^{18}	6.653×10^{13}	2.242×10^{18}	8.201×10^{13}

Tabl 4: Crynodebau o werthoedd sefydlog dwyseddau'r cludyddion a'r ffotonau ar gyfer y donfedd fer a'r donfedd hir, ar gyfer y cysonion cypledig o 19.45% hyd at 82.05% ar gyfer y strwythur gan Leinonen et al.

Gyda'r gwerthoedd cyfradd gyson a gafwyd uchod, roedd wedyn yn bosibl gwneud cyfrifiad o'r lled llinell ar gyfer pob cysonyn cypledig, gan ddefnyddio hafaliad addasedig Schawlow-Townes (8) a gwerthoedd o dabl 3. Dylid nodi mai lled llinell Schawlow-Townes, $\Delta\nu_{ST}$, yn unig a gyfrifwyd yma, a bod yr ehangiad oherwydd allyriad digymell a sŵn cludyddion ($1 + \alpha^2$) wedi cael ei anwybyddu gan fod y gwerthoedd hyn yn amherthnasol yr adeg hon. Mae tabl 5 yn crynhoi gwerthoedd lled llinell Schawlow-Townes ar gyfer y strwythur VECSEL gan Leinonen et al. ar gyfer pob cysonyn cypledig.

Fel y disgwylid, roedd lled llinell y donfedd fer yn aros yn gyson ar 7.699MHz, tra oedd lled llinell y donfedd hir yn cynyddu'n raddol wrth i'r cysonyn cypledig gynyddu. Mae hyn yn digwydd hyn oherwydd bod y cyflwr sefydlog ar gyfer dwysedd y ffotonau yn cynyddu wrth i'r cysonyn cypledig gynyddu, ond, yr un pryd, mae'r cyflwr sefydlog ar gyfer dwysedd y cludyddion yn lleihau.

CC (%)	Tonfedd fer $\Delta\nu$	Tonfedd hir $\Delta\nu$
19.45	7.699MHz	6.45MHz
38.25	7.699MHz	5.76MHz
60.69	7.699MHz	5.23MHz
82.05	7.699MHz	4.88MHz

Tabl 5: Crynodebau o led llinell Schawlow-Townes ar gyfer y strwythur gan Leinonen et al. ar gyfer cysonion cypledig o 19.45% hyd at 82.05%

Dadansoddwyd y strwythur a ddyluniwyd yn yr un modd, ond cafodd y cysonion cypledig eu newid i gyd-fynd â'r rhai a gyfrifwyd yn flaenorol ar gyfer y strwythur hwn. Eto, fel gyda'r strwythur VECSEL blaenorol, ni newidiodd y cyflwr sefydlog ar gyfer dwyseddau'r cludyddion a'r ffotonau ar gyfer y donfedd fer gan nad oedd unrhyw olau yn cael ei gyplu i'r donfedd hon. Ar gyfer y donfedd hir roedd yr un patrwm yn amlwg, lle roedd y gwerth cyflwr sefydlog ar gyfer dwysedd y ffotonau yn cynyddu wrth i'r cysonyn cypledig gynyddu, tra oedd y gwerth cyflwr sefydlog ar gyfer dwysedd y cludyddion yn lleihau. Dangosir y canlyniadau hyn yn Nhabl 6.

Fel y disgwylid, roedd y gwerth uchafswm ar gyfer cyflwr sefydlog dwysedd y ffotonau yn y strwythur a ddyluniwyd yn sylweddol is, ac mae hyn i'w ddisgwyl oherwydd y gwerthoedd llai mewn cysonion cypledig.

Eto, o'r gwerthoedd yn nhabl 6, mae'n bosibl cyfrifo gwerthoedd lled llinell Schawlow-Townes ar gyfer y donfedd fer a'r donfedd hir. Mae'r gwerthoedd a gyfrifwyd i'w gweld yn Nhabl 7.

Mae'r un patrwm yn amlwg lle mae'r lled llinell ar gyfer y donfedd fer yn aros yn gyson ar gyfer pob gwerth cysonyn cypledig, tra bod y lled llinell ar gyfer y donfedd hir yn lleihau'n raddol wrth i'r cysonion cypledig gynyddu. Mae hyn eto oherwydd y ffaith fod dwysedd y ffotonau yn cynyddu, tra mae dwysedd y cludyddion yn lleihau.

CC (%)	Tonfedd Fer		Tonfedd Hir	
	Dwysedd Cludwyr	Dwysedd Ffotonau	Dwysedd Cludwyr	Dwysedd Ffotonau
15.305	2.537x10 ¹⁸	6.653x10 ¹³	2.445x10 ¹⁸	7.156x10 ¹³
15.657	2.537x10 ¹⁸	6.653x10 ¹³	2.443x10 ¹⁸	7.165x10 ¹³
16.115	2.537x10 ¹⁸	6.6534x10 ¹³	2.441x10 ¹⁸	7.178x10 ¹³
18.768	2.537x10 ¹⁸	6.653x10 ¹³	2.428x10 ¹⁸	7.245x10 ¹³

Tabl 6: Crynodebau o werthoedd sefydlog dwyseddau'r cludyddion a'r ffotonau ar gyfer y donfedd fer a'r donfedd hir, ar gyfer y cysonion cypledig o 15.305% hyd at 18.768% ar gyfer y strwythur a ddyluniwyd

CC (%)	Tonfedd Fer $\Delta\nu$	Tonfedd Hir $\Delta\nu$
15.305	7.699MHz	6.65MHz
15.657	7.699MHz	6.63MHz
16.115	7.699MHz	6.61MHz
18.768	7.699MHz	6.48MHz

Tabl 7: Crynodebau o led llinell Schawlow-Townes ar gyfer y strwythur a ddyluniwyd ar gyfer y cysonion cypledig o 15.305% hyd at 18.768%

Drwy gymharu'r gwerthoedd lled llinell ar gyfer y ddau strwythur, gwelir bod y lled llinell ar gyfer y donfedd fer yn aros yn gyson ar 7.669MHz, tra bo'r gwerthoedd ar gyfer y donfedd hir yn uwch yn y strwythur sydd wedi ei ailddylunio.

Gwerth uchafswm y lled llinell ar gyfer y strwythur gwreiddiol a'r strwythur a ddyluniwyd yw 6.45MHz a 6.65MHz, yn ôl eu trefn. Mae hyn yn rhoi gwahaniaeth o 0.20MHz yn unig rhwng y ddau strwythur. Drwy gymharu'r gwerthoedd lled llinell â gwerth uchafswm y cysonyn cypledig, gwelwn fod gan y strwythur gan Leinonen et al. led llinell o 4.88MHz, tra mae gan y strwythur a ddyluniwyd led llinell o 6.48MHz, gan roi gwahaniaeth o 1.6MHz. Noder hefyd fod y gwahaniaeth rhwng y donfedd fer a'r donfedd hir yn llai yn y strwythur a ddyluniwyd nag yn y strwythur gan Leinonen et al.

Er mwyn dadansoddi'r lled llinell yn fanylach, rhaid trawsnewid y gwerthoedd lled llinell amledd (Hz) yn werthoedd lled llinell tonfedd (nm) er mwyn sefydlu terfyn ar gyfer y gwahaniad uchafswm posibl rhwng y ddwy donfedd lle na fyddai'n bosibl gweld dwy linell gydrannol yn y sbectrwm. Gwneir y trawsnewid gan ddefnyddio'r fformiwla ganlynol:

$$\Delta f = \frac{c}{\lambda^2} \Delta \lambda \quad (12)$$

Ile diffinnir Δf fel y lled llinell amledd (Hz); c yw buanedd goleuni, λ yw'r donfedd ganolig a $\Delta\lambda$ yw lled linell y donfedd (nm).

Ar gyfer y strwythur VECSEL gwreiddiol, darganfuwyd mai lled llinell y donfedd fer oedd 0.02pm, a 0.017pm ar gyfer y donfedd hir. Ar gyfer y strwythur a ddyluniwyd, darganfuwyd mai 0.02pm oedd y lled llinell ar gyfer y donfedd fer, a 0.021pm ar gyfer y donfedd hir. Gan fod y gwerthoedd mor agos at sero, mae hyn yn awgrymu nad oes terfyn lleiaf posibl lle na fyddai'n bosibl gweld dwy linell gydrannol yn y sbectrwm. Awgryma hyn felly na fyddai ehangu lled llinell yn ffactor cyfyngu i leihau'r gwahaniaeth yn sylweddol rhwng dwy donfedd mewn laser tonfedd ddeuol.

VIII. Casgliad

I gloi, cynigiwyd strwythur er mwyn creu allyriad dwy donfedd â lleihad sylweddol yn y gwahaniaeth rhwng y tonfeddi o'i gymharu â'r hyn a adroddwyd gan Leinonen et al. Mae'r anghysondeb, ac felly'r gorgyffyrddiad, rhwng y patrwm sefydlog tonfedd fer, y patrwm sefydlog tonfedd hir, a'r pantiau cwantwm yn y rhanbarthau gweithredol tonfedd fer a hir hefyd wedi cael ei leihau. Mae lleihau'r gorgyffyrddiad hwn yn gwella perfformiad cyffredinol strwythur y VECSEL er mwyn galluogi'r VECSEL i weithredu ar bwerau pwmp uwch (>2.4W). O ganlyniad, yn y strwythur a ddyluniwyd mae nodau'r donfedd fer ac antinodau'r donfedd hir nawr yn alinio â'r pantiau cwantwm dwfn yn y rhanbarth gweithredol tonfedd hir. Awgryma hyn felly fod yr effaith hunanguriadol yn cael ei leihau drwy leihau'r amsugniad gweddillol yn y pantiau cwantwm dwfn.

Hefyd, er bod y lled llinell ar gyfer y donfedd hir yn llai yn y strwythur VECSEL gwreiddiol nag yn y strwythur newydd, nid yw'n ymddangos y byddai'r lled llinell yn ffactor cyfyngu o ran lleihau'r gwahaniaeth yn sylweddol rhwng y ddwy donfedd mewn VECSEL dwy donfedd. Mae hyn oherwydd ei bod yn amlwg o'r canlyniadau nad oes terfyn ar y gwahaniaeth rhwng y donfedd fer a'r donfedd hir.

Ar sail canlyniadau'r papur hwn, gellir cynllunio laser amldonfedd ag unrhyw wahaniaeth rhwng y ddwy donfedd, gyda'r nod yn y pen draw o greu ymbelydredd teraherts.

Cydnabyddiaeth

Cefnogwyd y gwaith hwn gan ysgoloriaeth y Coleg Cymraeg Cenedlaethol, rhif YSG12/16.

Cyfeiriadau

- Badilita, V., Carlin, J. F., Ilegems, M., et al. (2004), 'Rate-equation model for coupled-cavity surface-emitting lasers', *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 40 (12), 1646–56.
- Carlin, J. F., Stanley, R. P., Pellandini, P., et al. (1999), 'The dual wavelength bi-vertical cavity surface emitting laser', *Applied Physics Letters*, 75 (7) 908–10.
- Coldren, L. A. a Corzine, S. W. (1995), *Diode Lasers and Photonic Integrated Circuits* (New York: Wiley).
- Fan, L., Fallahi, M., Hader, J., et al. (2007), 'Linearly polarized dual-wavelength vertical-external-cavity surface-emitting laser', *Applied Physics Letters*, 90 (18), 181124-1–3.
- Geske, J., Gan, K. G., Okuno, Y. L., et al. (2004), 'Vertical-cavity surface-emitting laser active regions for enhanced performance with optical pumping', *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 40 (9), 1155–62.
- Grasso, D. M., a Choquette, K. D. (2003), 'Threshold and modal characteristics of composite-resonator vertical-cavity lasers', *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 39 (12), 1526–30.
- Hakki, B. (1980), 'Optical and microwave instabilities in injection lasers', *IEEE Journal of Applied Physics*, 51 (1) 68–73.
- Henry, C. H. (1982), 'Theory of the linewidth of semiconductor lasers', *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 18 (2), 259–64.
- Henry, C. H. (1983), 'Theory of the phase noise and power spectrum of a single mode injection laser', *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 19 (9), 1391–97.
- Hessenius, C., Lukowski, M., a Fallahi, M. (2012), 'High-power tunable two-wavelength generation in a two chip co-linear t-cavity vertical external cavity surface-emitting laser', *IEEE Applied Physics Letters*, 101, 12, 121110-1–3.
- Hidaka, T., a Hatano, Y. (1991), 'Simultaneous two wave oscillation LD using biperiodic binary grating', *IEEE Electronics Letters*, 27, 12, 1075–6.
- Kitaeva, G. (2008), 'Terahertz generation by means of optical lasers', *Laser Physics Letters*, 5 (8), 559–76.
- Leinonen, T., Morozov, Y. A., Härkönen, A., et al. (2005), 'Vertical External-Cavity Surface-Emitting Laser for Dual-Wavelength Generation', *IEEE Photonics Technology Letters*, 17 (12), 2508–10.
- Lin, C. F., Chen, M. J. a Lee, B. L. (1998), 'Wide-range tunable dual-wavelength semiconductor laser using asymmetric dual quantum wells', *IEEE Photonics Technology Letters*, 10 (9), 1208–10.
- Lax, M. (1967), 'Classical noise V. Noise in self-sustained oscillators', *Physical Review*, 160, 290.
- Morozov, Y. A., a Morozov, M. Y. (2013), 'Intracavity Nonlinear Frequency Down-Conversion in a Continuous-Wave Operation Regime of a Dual-Wavelength Vertical-External-Cavity Surface-Emitting Laser', *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 19 (5), 1702105-1–5.

- Osinski, M., a Buus, J. (1987), 'Linewidth broadening factor in semiconductor lasers – an overview', *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 23 (1), 9–29.
- Pal, V., Trofimoff, P., Miranda, B. X., et al. (2010), 'Measurement of the coupling constant in a two-frequency VECSEL', *Optics Express*, 18 (5), 5008–14.
- Paschotta, R. (2008), 'Schawlow–Townes Linewidth', yn Paschotta, R. (gol.), *Encyclopaedia of Laser Physics and Technology*, argraffiad 1af (Berlin: Wiley-VHC), t. 655.
- Pellandini, P., Stanley, R. P., Houdre, R., et al. (1997), 'Dual-Wavelength laser emission from a coupled semiconductor micro-cavity', *Applied Physics Letters*, 71 (7), 864–6.
- Poguntke, K., Soole, J. B. D., Scherer, A., et al. (1993), 'Simultaneous multiple wavelength operation of a multistripe array grating integrated cavity laser', *Applied Physics Letters*, 62, (17), 2024–6.
- Saeedkia, D., Mansour, R. R. a Safavi-Naeini, S. (2005), 'Analysis and design of a continuous-wave terahertz photoconductive photomixer array source', *IEEE Transactions, Antennas and Propagation*, 53 (12), 4044–50.
- Schawlow, A. L. a Townes, C. H. (1958), 'Infrared and optical masers', *Physical Review*, 112 (6), 1940–9.
- Scheller, M., Yarborough, J. M., Moloney, J. V., et al. (2010), 'Room temperature continuous wave milliwatt terahertz source', *Optics Express*, 18 (26), 27112–7.
- Van der Ziel, J. P. (1979), 'Spectral broadening of pulsating $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ double heterostructure lasers', *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 15 (11), 1277–81.
- Wilmsen, C., Temkin, H., a Coldren, L. A. (1999), *Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers – Design, Fabrication, Characterization and Applications* (Cambridge: Cambridge University Press).
- Yariv, A. (1989), *Quantum Electronics*, 3ydd argraffiad (New York: Wiley).
- Yu, S. F. (2003), *Analysis and Design of Vertical Cavity Surface Emitting Lasers* (New Jersey: Wiley).
- Zhao, B., Chen, T. R., a Yariv, A. (1993), 'A comparison of amplitude-phase coupling and linewidth enhancement in semiconductor QW and bulk lasers', *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 29 (4), 1027–30.