

## Ⅲ族窒化物を用いた波長選択型紫外線検出器

### Wavelength selective UV photodiode based on group III nitride semiconductors

研究代表者 名城大学理工学部電気電子工学科講師 天野 浩

Assistant Professor, Department of Electrical and Electronic Engineering,  
Meijo University, Hiroshi AMANO

UV photodiode (PD) using p-AlGaIn/n-GaInN single heterostructure was fabricated for the first time. Spectral response of the PD shows excellent wavelength selectivity. Therefore, it is found that group III nitride is promising for the application to short wavelength detectors such as UV-B detectors and flare sensors.

#### 研究目的

最近、化合物半導体の分野で、Ⅲ族窒化物半導体が多く研究者の注目を集めている。AlN, GaN, InN及びそれらの混晶はワルツ鉱構造を形成したとき直接遷移型バンド構造となり、バンドギャップが室温で1.9eVから6.2eVまで、可視全域及び近紫外域をカバーするため、特に短波長発光及び受光素子用材料として期待されている。

他の化合物半導体と比較してⅢ族窒化物は格子定数が小さく、格子整合する基板用材料が少ない。更に、成長温度において窒素平衡蒸気圧は極めて高く、チョクラスキー法など、他の化合物半導体と同様の方法では大型バルク単結晶作製は極めて困難である。従って、各種機能素子作製に必要な高品質薄膜作製は、従来極めて困難であった。加えて、特にGaNやInNは、故意に不純物を添加しなくても強いn型伝導性を示し、アクセプタ不純物を添加しても高抵抗化するのみで、pn接合はおろか、p型結晶さえも作製不可能といわれていた。そのため、その潜在能力とは裏腹に、研究者数は少なかった。1970年代、研究ブームが起きたが、上記の問題のため、他の材料系に研究の主眼を移した研究グループも多かった。

1986年、筆者らは薄膜作製法の一つである有機金属化合物気相成長(MOVPE)法において、低温堆積緩衝層を用いたⅢ族窒化物結晶成長技術を確立し、サファイア上に極めて高品質のGaN薄膜を得ることに

成功した<sup>1)</sup>。更に1989年、アクセプタ不純物としてマグネシウム(Mg)を添加して高抵抗化したGaN結晶に電子線照射することにより、電気的特性が変化する現象を見だし、世界で初めてp型GaN結晶及びpn接合の作製に成功した<sup>2)</sup>。これらの成果等が発端となり、再びⅢ族窒化物研究ブームがおき、青色発光ダイオード(LED)が1993年末に実用化されたのは周知の事実である<sup>3)</sup>。現在では、研究者人口も急増し、化合物半導体分野では、最もホットなテーマの一つに数えられている。

Ⅲ族窒化物の応用は、発光素子に留まらない。本論文題目に掲げた受光素子は、その可能性の一つである<sup>4)</sup>。Ⅲ族窒化物、特にGaNやAlGaInを用いると、可視光には反応せず紫外線のみ反応する光検出器が実現できる。更にヘテロ接合の利用により、特定波長の紫外線の検出も可能である。このような波長選択型検出器は、従来主に使われているSi検出器では、不可能である。紫外線B波検知や火災失火検知などは、現在光電管が用いられているが、廉価で堅牢な固体素子により実現できれば、皮膚癌の予防、ガス漏洩による爆発事故の防止等、人の健康や社会生活を守る上で、非常に大きな意義がある。

本研究では、上記光検出器の基礎となるAlGaIn/GaNヘテロ構造を利用した波長選択型紫外線フォトダイオード(UV-PD)を設計・試作した。

研究経過

MOVPE法を用いてサファイア(0001)面基板上にp-AlGaIn/n-GaNシングルヘテロ構造を作製した。Ga, Al原料はトリメチルガリウム及びトリメチルアルミニウム、窒素原料はアンモニアを用いた。ドナー、及びアクセプタ不純物は、それぞれシリコン(Si)及びマグネシウム(Mg)とし、原料ガスとして水素希釈のモノシラン及びビスシクロペンタジエニルマグネシウムを用いた。

まず、サファイア基板を脱脂洗浄、王水、非酸処理して、研磨汚れを取り除いた後、成長炉にセットする。成長炉では、高温水素処理して、表面のCOやCH系不純物を除去した後、低温でAlN緩衝層を堆積する。その後、基板温度をエピタキシャル温度まで上げてSiドープn型GaIn (n-GaIn:Si)、およびMgドープAlGaIn (AlGaIn:Mg)を順次成長する。GaInの層厚は3 μm、AlGaInの層厚は0.5 μmであり、混晶層のAlNモル分率は0.12とした。成長後、ウェーハを800°C、30分間窒素気流中で熱処理することにより、AlGaIn:Mg層をp型化した。n-GaIn層の自由電子濃度は、室温で $2 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ 、p-AlGaIn層の自由正孔濃度は室温で $1 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$ である。

基板であるサファイアは絶縁性であり、SiやGaAsと異なり、電極形成には工夫を要する。本研究では、塩素による反応性イオンエッチングを用いて、p-AlGaInを一部取り除き、n-GaInにTi/Al、p-AlGaInにNi電極を形成した。

吸収スペクトルのデータは、PD設計に必須であるが、III族窒化物系では、特に混晶系のデータは今まで報告例が殆どない。そこで、本研究では各層の吸収係数スペクトルを、分光エリプソメーターを用いて評価した。

試作したPDの分光感度測定は、Xeランプを光源とし、焦点距離10cmの分光器を用いて単色化した光を試料表面に照射した。使用したXeランプ及び分光器の波長特性より、今回の測定で測定可能な波長範囲は280nm~750nmである。

#### 研究成果

逆バイアスされた試料の光電流をオペアンプにより増幅し、分光器の波長を少しずつ変化させてスペクトル測定した。入射光強度は、標準のSi PDを用いて校正を行った。

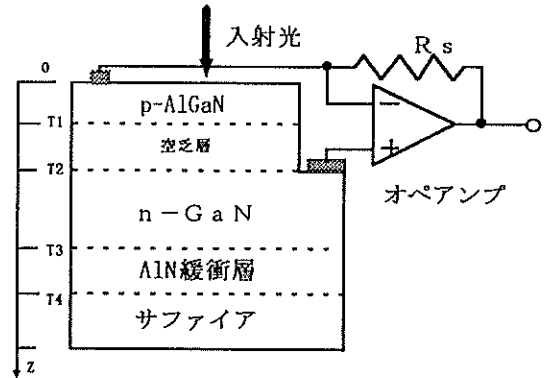


図1 計算に用いたPDのモデル

計算に用いたモデルを図1に示す。5つの領域に分け、特に光電流を発生する三つの領域での光電流を加算してスペクトルを求めた。

- (I) p-AlGaIn 層 ( $0 < z < T_1$ )
- (II) 空乏層 ( $T_1 < z < T_2$ )
- (III) n-GaIn 層 ( $T_2 < z < T_3$ )
- (IV) AlN バッファ層 ( $T_3 < z < T_4$ )
- (V) Sapphire 基板 ( $T_4 < z$ )

各々の層の光電流は、(1),(2)の拡散方程式に(3)~(6)の境界条件を代入して解き、(7)~(9)式より求めた。光電流であるから、対象とするのは少数キャリアである。すなわち、p層内では電子、n層内では正孔である。総光電流は、(7)(8)(9)の合計である。

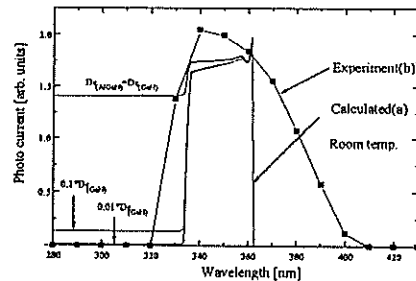


図2 試作したPDの分光感度測定の実験値(b)と計算値(a)。計算において、p型AlGaInでの電子の拡散係数は、GaNの電子移動度から直接求めた場合、その1/10の場合、及びその1/100の場合を示した。

計算結果を図2(a)に、また測定結果を同図(b)に示

す。計算において、Ⅲ族窒化物における少数キャリアの拡散係数は報告例がない。特にp型 AlGaN 中の電子の拡散係数は、合金散乱のほか捕獲準位などの影響により GaN の電子移動度から求められる拡散係数と比較して、小さいことが予想される。図では GaN の電子移動度から求めた拡散係数の場合、その1/10の場合、及び1/100の場合についても示した。図からわかるように、波長 320nm~400nm 付近までの光のみ感度のある波長選択型紫外線検出器が実現できた。計算値と比較すると、試作した PD は GaN のバンドギャップより低エネルギー側で感度を有する結果となった。これは GaN や AlGaN のミッドギャップ吸収に基づく光電流の影響と思われる。

試作した PD は AlGaN のバンドギャップより大きなエネルギーの領域では、殆ど感度がなかった。この結果から、p型 AlGaN 中の電子の拡散係数は、GaN の電子移動度から予想される拡散係数と比較して非常に小さいと考えられる。

今後の課題と発展

今後は、特に長波長領域において設計値との違いの要因を明らかにし、更に感度の絶対値評価等を行い、

Siなど実用化しているPDとの感度比較、動的応答特性などを評価する。また今回試作した PD は波長可変出来ない。今後はシュタルク効果を用いた選択波長可変 PD などにより、実用化の可能性を探る。

最後に、本研究の遂行に当たり多大なるご援助を頂いた日産日産科学振興財団に心より厚く御礼申し上げます。

#### 参考文献

1. H. Amano, N. Sawaki, I. Akasaki and Y. Toyoda; Appl. Phys. Lett., 48(1986)353.
2. H. Amano, M. Kito, K. Hiramastu and I. Akasaki; Jpn. J. Appl. Phys, 28 (1989) L2112.
3. S. Nakamura, T. Mukai and M. Senoh; Appl. Phys. Lett., 64 (1994)1687.
4. M. A. Khan, J. N. Kuznia, D. T. Olson, J. M. Van Hove, M. Blasingame and L. F. Reitz; Appl. Phys. Lett., 60(1992)2917.

付録 光電流の計算に用いた式

[拡散方程式]

$$D_e \frac{d^2 n}{dz^2} - \frac{n - n_0}{\tau_e} + \phi_0 \alpha_1 \exp(-\alpha_1 z) = 0 \quad (1)$$

$(0 < z < T_1)$

$$D_h \frac{d^2 p}{dz^2} - \frac{p - p_0}{\tau_h} + \phi_0 \alpha_2 \exp[-(\alpha_1 - \alpha_2)(T_1 + d_1)] \exp(-\alpha_2 z) = 0 \quad (2)$$

$(T_2 < z < T_3)$

$n_p, n_{p0}$ : それぞれ、光が照射されたときのp層内の電子密度、及び平衡状態のp層内の電子密度

$p_n, p_{n0}$ : それぞれ、光が照射されたときのn層内の正孔密度、及び平衡状態のn層内の正孔密度

$D_e, D_h$ : 電子及び正孔の拡散係数       $\tau_e, \tau_h$ : 電子及び正孔の寿命

$n_0$ : 熱平衡状態での電子密度       $p_0$ : 熱平衡状態での正孔密度

$\alpha_1$ : GaN の吸収係数       $\alpha_2$ : AlGaN の吸収係数

$\phi_0$ : 単位領域当たりに入射する光子流量

$d_1$ : p 層空乏層幅       $d_2$ : n 層空乏層幅

である。拡散係数は、AlGaN, GaN とともにGaN中の電子及び正孔の移動度を元にして、アインシュタインの関係

式より導出した。

[境界条件]

$$D_e (dn_p / dz)_{z=0} = S(n_p - n_{p0})_{z=0} \quad (3)$$

$$(n_p - n_{p0})_{z=T_1} = 0 \quad (4)$$

$$(p_n - p_{n0})_{z=T_2} = 0 \quad (5)$$

$$(p_n - p_{n0})_{z=T_3} = 0 \quad (6)$$

( 但し、 $S$ : 混晶の表面再結合速度 )

[各層での拡散電流]

$$I_{n0} = eD_e \left( \frac{dn_p}{dz} \right)_{z=T_1} \quad (7)$$

$$I_{p0} = -eD_h \left( \frac{dp_n}{dz} \right)_{z=T_2} \quad (8)$$

$$I_d = e\phi_0 \exp(-T_1 \alpha_1) \cdot [1 - \exp(-d_1 \alpha_1 - d_2 \alpha_2)] \quad (9)$$

発表論文リスト

1. H. Amano and I. Akasaki, Abstracts of Topical Workshop on III-V Nitrides, Nagoya, Japan, September 23,(1995)SP-2.
2. H. Sakai, T. Koide, H. Suzuki, M. Yamaguchi, S. Yamasaki, M. Koike, H. Amano and I. Akasaki, Jpn. J. Appl. Phys., 34(1995)L1429.
3. I. Akasaki, H. Amano, S. Sota, H. Sakai, T. Tanaka and M. Koike, Jpn. J. Appl. Phys., 34(1995)L1517.
4. Amano, H. Sakai, S. Sota, T. Tanaka and I. Akasaki, Proc. Inter. Symp. Blue Laser and Light Emitting Diodes, Chiba, Japan, March 7(1996)Th-10.
5. I. Akasaki, S. Sota, H. Sakai, T. Tanaka, M. Koike and H. Amano, Electron. Lett., 32(1996)1105.