

フォトダイオードにおけるキャリア輸送の特性の解析とモデル化

金野 幸吉 (COE研究員),
三浦 道子 (先端研半導体集積科学専攻 教授)

1. 研究目的

高い集積化と高速化を可能にするため、集積回路におけるデバイスのサイズは以前にも増して微細化の一途を辿っている。しかし、それに伴って金属配線による遅延の効果がトランジスタのスイッチングにおける遅延を圧倒し、顕著なものとなりつつある。こういった状況のもとで、光配線の導入は更なる高速化に向けて魅力的なものと思われる。このような光電子集積回路が現実味を帯びてきた段階では、その回路設計を可能にする回路シミュレーション用のデバイス・モデルが必要不可欠である。また、デバイス・モデルを構築する上で、デバイス内でのキャリア輸送など、その物理的理解も必要とされる。本研究では、光配線の受光部分に焦点を当て、受光デバイスにおけるキャリア輸送の特性及びモデル化に関しての研究を行った。そして、その成果は論文[2,3,4]としてまとめると共に、応用物理学会においても報告を行った。

2. これまでの研究成果概要

2.1 高い光照射の下でのフォトダイオードにおけるキャリア輸送の特性

まず、実験と理論の両面からシリコン $p-n$ フォトダイオードの光応答に対して研究を行った。その研究成果は最近出版された論文 [2,3] においてまとめられている。

理論的なアプローチとして一般に二つの数値解析手法が考えられる。一つはモンテ・カルロ法で、もう一つはポアソン方程式、連続の式、ドリフト拡散近似に基づく電流密度式から成るデバイス方程式系を解く方法である。前者はキャリア一個一個の挙動を模倣するため非常に長い計算時間が必要とされる。一方、後者は「キャリア移動度」というパラメータを導入し、複雑なマイクロな過程を簡略化するため、計算時間が大幅に短縮される。それゆえに後者の方法は現実的で MEDICI [5] などのデバイス・シミュレータに広く応用されている。

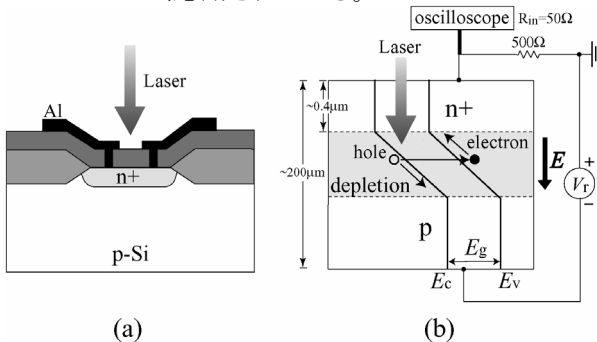


Fig 1 (a) $p-n$ フォトダイオードの構造
(b) 測定方法

ドリフト拡散近似において、最も重要な因子となるのは既に言及した移動度であり、適切な移動度モデルに対して、キャリア輸送の正しい解が再現できる。さらに言及すべき点として、「ドリフト拡散近似は準平衡な状態においてのみ有効である」ということが挙げられる。

しかしながら、そのような準平衡状態は、フォトダイオードのように逆バイアスが加えられたデバイスでは正確には正しくなく、むしろフォトダイオードの場合は非平衡状態にあると考えられる。それゆえにフォトダイオードにおいて、ドリフト拡散近似が適用できるかどうかを明らかにすることは、キャリア輸送の特性を理解する上でも重要である。

我々は試作したシリコン $p-n$ フォトダイオードと波長 532nm、半値幅 ~ 1 ns のパルス・レーザーを用いて Fig. 1 に示すような測定を行った。Fig. 2 の左は測定結果を示している。実験と同じ条件の下で、2次元デバイス・シミュレータMEDICIを用いて光電流を再現した結果をFig. 2の右側に示す。低いレーザー強度の下では測定結果はシミュレーション結果と良く一致している。一方、レーザー強度が強い場合では、測定結果とシミュレーション結果との間で、不一致が生じる。MEDICIで計算した場合はある飽和点が生じ、波形が台形状になる。このような形状はシミュレーションにおける移動度モデルを変更しても取り除くことは出来なかった。

我々は、オーダー評価の基にこの形状の原因が空間電荷制限電流の効果により生じているということを確認した[6]。通常用いられる空間電荷制限電流の表式の導出に対しては、ドリフト拡散近似が仮定されている。ここで帰結した結論は、光強度が強く逆バイアスが弱い場合、そのドリフト拡散近似が妥当でないということの意味している。さらにこの帰結はデバイス内でのキャリアのダイナミクスに対する数値解析結果からも確認された[4]。

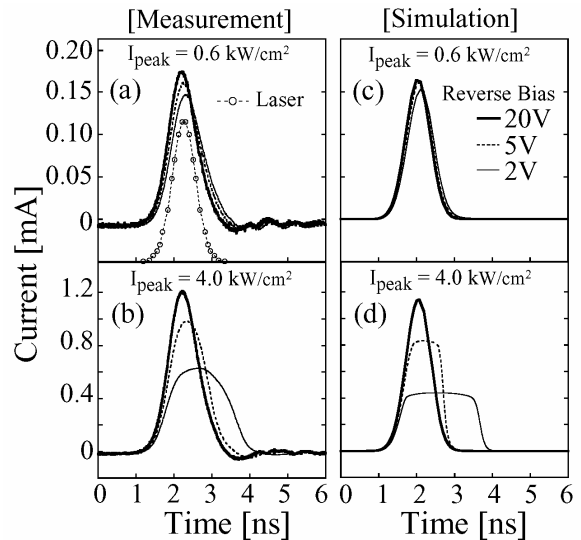


Fig 2 測定とシミュレーションとの比較

我々はこの研究からドリフト拡散近似という枠組みの中で、より正確に光電流を再現するためには更なる移動度モデルの修正が必要であるということを指摘した。

2.2 縦型 $p-i-n$ フォトダイオードにおけるキャリア輸送のモデル化

光電子集積回路を設計するためには、光電子デバイスの特性を記述する正確で物理的なモデルが必要

不可欠である。我々は縦型の $p-i-n$ フォトダイオードに注目し、キャリア輸送のモデルの開発を推し進めた。光応答の特性を解析する上で一般に二つのアプローチが考えられる：数値計算によるアプローチ[7]および解析的なアプローチ[8]である。回路シミュレーション用のモデルを構築する上では、計算時間の大幅な短縮という点で後者の方法が優れている。それゆえに本研究でも後者のアプローチを採用した。

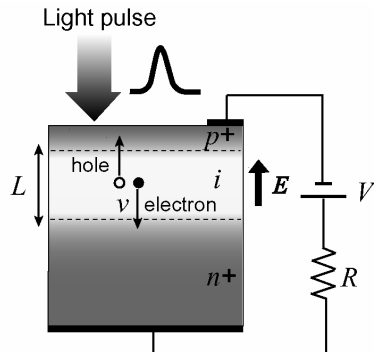


Fig 3 縦型 $p-i-n$ フォトダイオードの構造

我々は Fig.3に示すような縦型の $p-i-n$ フォトダイオードに関して実際にモデル化を行った。フォトダイオードの高周波応答は、主に三つの因子のより制限される：(1)真性層をキャリアが走行する時間、(2)RC 遅延時間、(3)キャリア拡散に伴う時間。最初の二つの因子は参考文献[8]において既に議論された。しかし、三つ目の因子に関してはこれまでしばしば無視されて来ており、高周波応答に対する効果に関してはまだ解析的に研究されていない。しかし、キャリア拡散はいくつかの条件の下で支配的となり、遮断周波数を決定する(詳しくは文献[4]参照)。

我々は、最新の論文[4]において、このような拡散の効果を考慮した縦型 $p-i-n$ フォトダイオードの光電流に対する高周波応答特性の新しい定式化を示した。さらに我々は時間領域での光電流を再現するため、スペクトル法[9]に基づくシミュレーション・スキームを発展させた。計算時間の大幅な短縮にもかかわらず、Fig.4に示すように我々の計算結果の精度は、2次元デバイス・シミュレータ MEDICI のものと同等である。また、我々の定式化は振動数領域で行っているため、ハーモニック・バランス・シミュレーション[10]との整合性が非常に良い。それゆえに、本研究の成果は光電子集積回路の回路シミュレーションを実行する上においてとても有用である。

3. まとめ

我々は、高い照射の下での $p-n$ フォトダイオードに関する光応答の研究を行い、既存の移動度モデルでは記述できないキャリア輸送の特性を明らかにした。そして、現在ある移動度モデルをさらに修正する必要があるということを指摘した[2,3]。また我々は縦型の $p-i-n$ フォトダイオードにおけるキャリア輸送のモデル化も行った[4]。そのモデルは、2次元デバイス・シミュレータの結果と同等な精度を持っている。それゆえに、光電子集積回路の回路シミュレーションに対して、我々のモデルは非常に有用と思われる。

4. 今後の予定

今後としては、横型 $p-i-n$ フォトダイオードに関する研究を計画している。この種のフォトダイオードは、光の吸収長に左右されないため、高い感度を持つ。さらに VLSI プロセスとの整合性も良い。我々は目下のところ、横型のフォトダイオードに対するキャリア輸送のモデル化を試みている。そして、さらにこのようなフォトダイオードを利用した光電子集積回路の回路シミュレーションの実現を目指している。

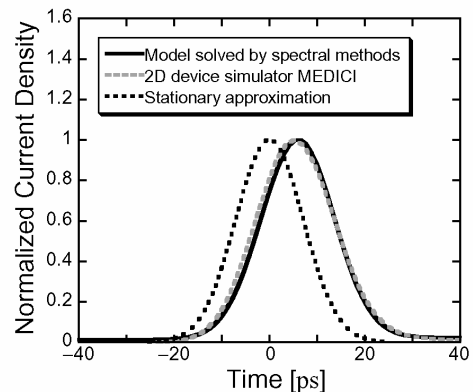


Fig 4 発展させたモデルによる光電流の計算

参考文献

- [1] L. C. Kimerling, Appl. Surf. Sci. **159**, 8 (2000).
- [2] O. Matsushima *et al.*, Semicond. Sci. Tech. **19**, S185(2004);
- [3] K. Konno, *et al.*, Appl. Phys. Lett. **84**, 1398(2004).
- [4] K. Konno, *et al.*, Submitted to J. Appl. Phys.
- [5] MEDICI User's Manual Synopsys (2002).
- [6] See, for example, A. Rose, Phys. Rev. **97**, 1538 (1955).
- [7] See, for example, P. S. Matavulj *et al.*, J. Lightw. Tech. **15**, 2270 (1997).
- [8] R. Sabella, S. Merli, IEEE J. Quant. Electron. **29**, 906 (1993); G. Torsesse *et al.*, Microw. Opt. Tech Lett. **31**, 329 (2001) and reference therein.
- [9] See, for example, B. Mercier, *An Introduction to the Numerical Analysis of Spectral Methods* (Springer-Verlag, Berlin, 1989).
- [10] K. S. Kundert, A. Sangiovanni-Vincentelli, IEEE Trans. CAD-5, 521 (1986).

5. これまでの研究論文、発表等

- ① 査読論文
 1. O. Matsushima, K. Konno, M. Tanaka, K. Hara, M. Miura-Mattausch, "Carrier Transport in Highly Generated Carrier Concentration", Semicond. Sci. Tech. **19**, S185 (2004)
 2. K. Konno, O. Matsushima, D. Navarro, M. Miura-Mattausch, "Limit of Validity of the Drift-Diffusion Approximation for Simulation of Photodiode Characteristic", Appl. Phys. Lett. **84**, 1398 (2004)
 3. K. Konno, O. Matsushima, D. Navarro, M. Miura-Mattausch, "High-Frequency Response of $p-i-n$ Photodiode Analyzed by an Analytical Model in Fourier Space", Submitted to J. Appl. Phys.
- ② 学会発表等
 1. K. Konno, O. Matsushima, K. Hara, G. Suzuki, M. Miura-Mattausch, "Modeling of Photoresponse of $p-i-n$ Photodiodes and Current Simulation based on the Spectral Method", 2004 春 応用物理学会.