

光電子デバイスのモデル化

三浦 道子 (先端研半導体集積科学専攻 教授),
金野 幸吉 (COE研究員),
松島 理 (先端研量子物質科学専攻 M2),
原 清仁 (先端研量子物質科学専攻 M1),
鈴木 学 (工学部電子システム課程 B4)

1. 研究目的

LSIにおける金属配線の信号伝播遅延は、高周波用の回路を実現することに対して、深刻な問題となる。単純な解決法としては金属配線の断面積を大きくすることが挙げられるが、これは高集積化を妨げるものである。そこで、近年LSIへの光配線の導入が注目を集めている[1]。光配線には発光デバイス、光導波路、受光デバイスが必要とされる。そして、その完全な実現のためには、さらに関連するデバイスの特性を記述するモデルが回路シミュレーションに必要とされる。

目下のところ、我々のグループでは、シリコン・チップに集積されるフォトダイオードの光応答に関して研究を行っている[2,3]。フォトダイオードは光配線の光検出器として使用されるものである。我々は既にフォトダイオードにおけるキャリア輸送の特性の解析及びその特性を記述する物理モデルの構築に着手している[4]。そのモデル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で非常に有用である。

2. これまでの研究成果概要

2.1 高い光強度の下での $p-n$ フォトダイオードの光応答

我々は通常のCMOS技術を用いてFig.1aに示すようなシリコン $p-n$ フォトダイオードを試作した。そして $p-n$ 接合の空乏領域にキャリアを発生させるため、レーザーを使用した。測定では、波長 532nm (シリコンに対する吸収係数 $\sim 10^4 \text{cm}^{-1}$ 、吸収深さ $\sim 1\mu\text{m}$)、半値幅 $\sim 1\text{ns}$ のパルス・レーザーを使用し、Fig.1bに示すようにオシロスコープを用いて光電流を測定した。生成された電子とホールは、加えられた逆バイアスによりそれぞれ反対側の電極にドリフトし、光電流として外部回路を流れる。Fig.2a に異なるバイアス条件の下での測定結果を示す。光強度が低い、もしくはバイアスが高い場合、光電流は入射光の波形を保ったまま出力され、遅延の影響は観測されない。しかし、光強度を上げた場合、低いバイアスの下でキャリア輸送の遅延が生じる。この点をさらに解析するため、我々は2次元デバイス・シミュレータMEDICI[5]を用いて、同じ条件下での光電流を再現した。シミュレーション結果をFig.2bに示す。この結果から、遅延の効果は光生成された多量のキャリアによる電場のスクリーニングが原因であることが分かった。キャリアは内在する電場を打ち消すため、一種の非線形効果としてキャリアの運動が

抑制され遅延が生じる。さらにFig.2において注目すべき点として、測定結果とシミュレーション結果との間で波形に食い違いがあるということが挙げられる。シミュレーションで見られる台形状の形は測定では観測されていない。我々は、この食い違いが、シミュレーションにおいてその基礎とされるドリフト拡散近似という仮定に問題があるということを確認した[3]。それゆえに我々は、このように光強度が強くと、バイアスが低い場合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ことを指摘した。この研究は、あらゆる条件下でのフォトダイオードにおけるキャリア輸送のモデル化に向けて、その基礎を作るものである。

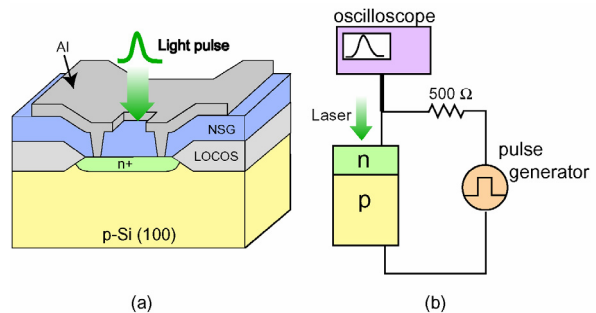


Fig. 1. (a) Cross-section of fabricated $p-n$ junction. (b) Setup for measuring photocurrent.

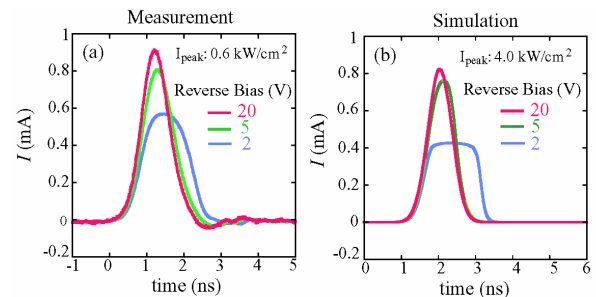


Fig. 2. (a) Measured and (b) MEDICI simulation results of photocurrent for different applied reverse biases.

2.2 縦型 $p-i-n$ フォトダイオードのモデル化

光電子集積回路の回路シミュレーション用のデバイス・モデルを発展させる目的で、我々は Fig.3 に示すような縦型 $p-i-n$ フォトダイオードにおけるキャリア輸送の解析的な定式化を行った[4]。縦型 $p-i-n$ フォトダイオードはこれまでに多くの研究者によって議論されてきており[6]、また解析的な定式化も行われて来た[7]。しかし、フォトダイオードの遮断周波数を特徴づける一つの重要な因子、つまり n^+ または p^+ 層で生成されるキャリアの「拡散」という因子がこれまで無視されてきた。この因子は負荷抵抗が小さく、真性層の距離が短い場合に遮断周波数を決定し、重要となる。よって、より物理的なモデルを構築するためには、この効果を考慮する必要がある。我々は、拡散の効果を考慮した光電流の解析的な解を振動数領域で導出した。それゆえに我々の定式化は、回路に対するハーモニック・バランス・シミュレーション[8]において大きな威力を発揮すると考えられる。我々はまた時間領域での電流を再現するため、スペクトル法[9]に基づき高速フーリエ変換 FFT を利用した光電流のシミュレーション・スキームを発展させた。これらを用いることによって、我々は非常に良い精度で電流を再現することが出来た(Fig.4 参照)。大幅な計算時間の短縮にもかかわらず、その計算精度は2次元デバイス・シミュレータ MEDICI のものと同等である。

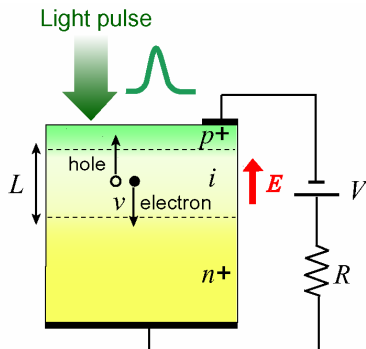


Fig. 3. Structure of a vertical $p-i-n$ photodiode

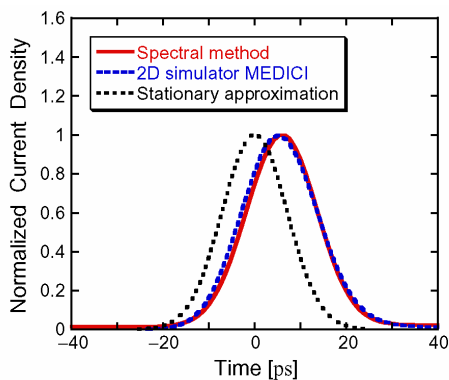


Fig. 4. Photocurrent calculated by our model in comparison with MEDICI and stationary approximation. The model is in excellent agreement with MEDICI.

2.3 横型 $p-i-n$ フォトダイオードの遮断周波数

我々はまた横型 $p-i-n$ フォトダイオードについても研究を行った。この種のフォトダイオードは光吸収長に制限されないという利点を持ち、高い感度を示す。また VLSI プロセスと整合性が良いという利点も持っている。我々は Fig.5 に示すような横型のシリコン $p-i-n$ フォトダイオードを試作し、光電流の測定を行った。

Fig.6a に異なるバイアス条件の下での光電流の測定値を示す。これから逆バイアスに対する依存性が確認される。また、この測定結果をもとにフーリエ変換から得られる振動数領域での結果を Fig.6b に示す。この測定では我々は ~ 60 ps のガウス形パルスを用いた。Fig.6b より、試作したデバイスがおおよそ 1GHz の遮断周波数を持っているということが確認できる。

また Fig.6a において、波形に tail が存在しているということが確認できる。この tail はフォトダイオードの応答を劣化させるものである。我々はこの tail の原因を明らかにするために、2次元デバイス・シミュレータ MEDICI[5]を用いてシミュレーションを行った。 n^+ および p^+ の拡散層の深さを $0.1\mu\text{m}$ から $5\mu\text{m}$ に変えてシミュレーションを行ったものを Fig.7 に示す。これより拡散層の深さが深くなるにつれて tail が減少することが分かる。それゆえに真性層を短くし、バイアスを高くするだけでなく、拡散層を深くすることによって、横型 $p-i-n$ フォトダイオードの遮断周波数を上げることが可能であるということが分かった[10]。この研究結果はモデルの構築に対しても非常に有用である。

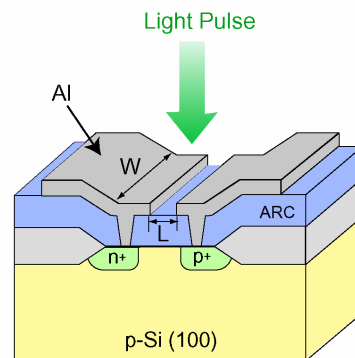


Fig. 5. Structure of a fabricated lateral $p-i-n$ photodiode.

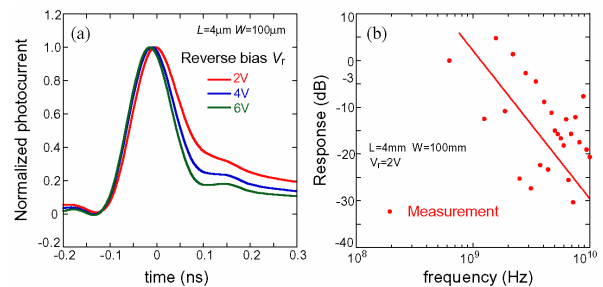


Fig. 6. (a) Measured photocurrent of the lateral $p-i-n$ photodiode. (b) The cut-off frequency of the fabricated photodiode is extracted to be ~ 1 GHz.

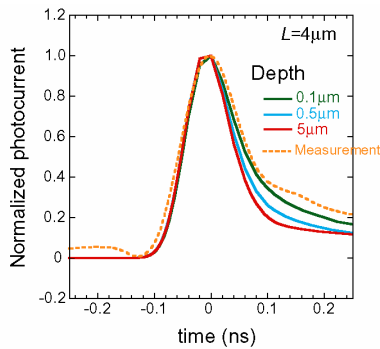


Fig. 7. MEDICI simulation of photocurrent for different diffusion depths. The tail reduces as the diffusion depth is increased.

3. まとめ

理論的アプローチと実験的アプローチの両方を用いて、我々はフォトダイオードの光応答に関して研究を行った。高い光照射の下での $p-n$ フォトダイオードの実験から、通常のドリフト拡散近似が適用出来ないキャリア輸送の特性を明らかにした。そして、なおもドリフト拡散近似を用いるためには、既存の移動度モデルの修正が必要であるということ指摘した。我々はまた横型 $p-i-n$ フォトダイオードに関しての光電流の測定も行った。この研究から、遮断周波数を決める要因である tail の原因を議論した。ここで得られた結果は横型フォトダイオードのモデル化に向けて非常に有用な理解を与える。さらに我々は縦型 $p-i-n$ フォトダイオードにおけるキャリア輸送のモデル化も行った。特に我々の定式化ではこれまで無視されてきた $n+$ または $p+$ 領域で生成されるキャリアの拡散を考慮している。このモデルを用いて得られた時間領域での電流に対する結果は2次元デバイス・シミュレータ MEDICI を用いて得られた結果と非常に良い一致を示しており、このタイプの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において非常に有用であると考えられる。

4. 今後の予定

今後の研究としては、これまでに行った実験的な研究を基礎に $p-n$ フォトダイオードと横型 $p-i-n$ フォトダイオードのモデル化を行うことを考えている。特に横型のフォトダイオードは縦型のフォトダイオードとは異なった特徴を持っている。横型では、キャリア走行の方向と光の入射方向が直交しており、光吸収長に依らないという利点を持っている。それゆえに、高い感度と高速性が実現可能である。また、横型は VLSI プロセスと整合性が良いため、シリコン基板だけからなるモノリシックな光検出器の実現が可能となる。最終的には我々は、発展させたモデルを用いて、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。

参考文献

- [1] See, for example, 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] Y. Leblebici, *et al.*, J. Lightw. Tech. **13**, 396 (1995); P. S. Matavulj *et al.*, J. Lightw. Tech. **15**, 2270 (1997) and reference therein.
- [7] 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.
- [8] K. S. Kundert, A. Sangiovanni-Vincentelli, IEEE Trans. CAD-5, 521 (1986).
- [9] See, for example, B. Mercier, *An Introduction to the Numerical Analysis of Spectral Methods* (Springer-Verlag, Berlin, 1989).
- [10] O. Matsushima, Master Thesis (Hiroshima University, February, 2003)

5. これまでの研究発表、特許等

① 原著論文

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 国際会議、学会発表等

1. O. Matsushima, K. Konno, M. Tanaka, K. Hara, M. Miura-Mattausch, "Carrier Transport in Highly Generated Carrier Concentration", International Conference on "Nonequilibrium Carrier Dynamics in Semiconductors", Modena, Italy, July 28-Aug 1, 2003.
2. 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.