

半導体中の深い準位を検出するための一方法

徳田 豊・田立 典泰・松村 覚

A Method to Detect Deep Levels in Semiconductors

Yutaka TOKUDA, Noriyasu TADACHI and

Satoru MATSUMURA

半導体中の深い準位を検出するための一方法が提案される。この方法は、pn接合に印加されるバイアス電圧の急激な変化に判ない接合容量が過渡的に変化するという現象に基づく。従来、接合容量の過渡的变化はダブルボックスカーやロックインアンプを用いて検出されている。我々が提案する方法はロックインアンプによる方法をさらに改善したものである。我々が提案した方法が中性子照射されたSi p⁺nダイオードに適用される。

1. まえがき

半導体中の深い準位は、半導体および半導体デバイスの電気的特性に著しい影響を与える。発光ダイオードは深い準位の性質を積極的に利用したものであるが、深い準位の多くは半導体デバイスの特性を劣化させる原因となる。例えば、発光ダイオードの通電劣化や半導体デバイスの放射線照射による劣化は深い準位が導入されたためだと考えられる。それ故、デバイスの劣化対策を考えるうえにおいても、また物性的にも半導体中の深い準位の振舞を調べることは興味深い。そのためには深い準位を検出するための有効で簡便な測定法が要求される。

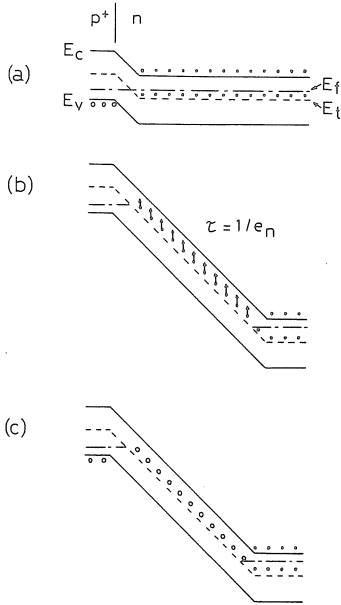
半導体中の深い準位を検出する方法は種々あるが、近年pn接合を利用する方法の発展が著しい。その中でもLangが提案したいわゆるDLTS法(Deep Level Transient Spectroscopy)は、検出感度、測定の速さおよび解析の容易さ等においてすぐれ、また二つ以上深い準位が存在してもスペクトロスコピックに決定でき、さらに少数キャリアトラップと多数キャリアトラップを区別できるので極めて便利である⁽¹⁾。この方法は、pn接合に印加されるバイアス電圧が急激に変化した時、深い準位の荷電状態の変化により接合容量が変化するという現象を利用したものである⁽²⁾。Langは、この接合容量の過渡的变化をダブルボックスカーを用いて検出している。その後、Miller⁽³⁾やKimerling⁽⁴⁾によって接合容量の過渡的变化を検出する新しい方法が提案されている。Kimerling⁽⁵⁾が提

案した方法では、接合容量の過渡的变化を検出するためにロックインアンプを用いている。

本論文においては、Kimerlingによって提案された方法を検討し、この方法の問題点を指摘し、その問題点を解決するための測定原理が提案される。さらに、我々が提案した測定原理を実現するための測定装置が製作され、中性子照射されたSi p⁺nダイオードに適用される。

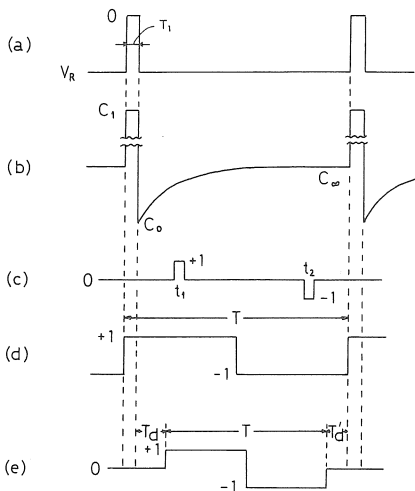
2. 測定原理

議論を容易にするため、ここではp⁺n接合を例にとる。p⁺n接合では空乏層の大部分はn側に広がるため接合容量の変化よりn側に存在する深い準位に関する情報が得られる。もちろん、議論はn⁺p接合についても成り立つ。まず、n側の準位が多数キャリア(この場合は電子)でうめられるバイアスパルス(多数キャリアパルスと呼ぶ)を印加した場合を考える。図1には、多数キャリアパルスを印加した場合のp⁺n接合のエネルギー帯図が示されている。図1(a)では零バイアスでの状態が示されている。零バイアスでは空乏層の幅が狭まり、フェルミ準位の位置より深い位置にあるトラップが電子でうまる。その後、逆バイアスを印加すると空乏層の幅は広がりこの空乏層内のトラップにとらえられていた電子は、熱放出確率(e_n)の逆数で与えられる時定数 τ で伝導帯中に放出される。図1(b)にはこの様子が示されている。図1(c)には、深い準位にとらえられていた空乏層内の電子がすべて放出し終わった後のp⁺n接合のエネルギー



第1図 多数キャリアパルスを印加した時のP⁺n 接合のエネルギー帯図。
(a) 零バイアス (b) 逆バイアス (c) 逆バイアス印加後達成された定常状態

一帯図が示されている。このような深い準位の荷電状態の変化に対応して接合容量の変化が生ずる。図2には、多数キャリアパルスが印加された場合の接合容量の過渡的变化の様子が示されている。図2 (a) は多数キャリアパルスであり、図2 () にはそのようなパルスに対応する接合容量の変化が示されている。図2では、多数キャリアパルスがくり返し接合に印加された場合の様子が示されている。零バイアスから逆バイアスにバイアス



第2図 多数キャリアパルスでP⁺n 接合に印加した時の接合容量の過渡的变化の様子およびその変化を検出するための測定原理。
(a) 多数キャリアパルス (b) 接合容量 (c) Lang による方法 (ダブルボックスカー) (d) Kimerling による方法 (ロックインアンプ) (e) 我々が提案する方法

電圧が変化した後の接合容量の過渡的变化は次式で与えられる。⁽¹⁾

$$C = C_{\infty} - (C_{\infty} - C_0) \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \quad (1)$$

ここで τ は熱放出確率の逆数で与えられ、今の例の場合次式で与えられる。

$$\tau = \frac{1}{e n} = \frac{1}{V_n \sigma_n N_c} \exp\left(\frac{E_c - E_t}{K T}\right) \quad (2)$$

ここで、 $e n$ は電子熱放出確率、 σ_n は電子捕獲断面積、 V_n は電子の熱平均速度、 N_c は伝導帯有効状態密度、 E_c は伝導帯のエネルギー、 E_t はトラップのエネルギー準位、 K はボルツマン定数、 T は温度である。(1)式において C_{∞} は逆バイアス印加後達成された定常状態での接合容量であり、零バイアス時にトラップにとらえられた電子がすべて放出し終わった状態に対応し、エネルギー帯図では図1 (c) に対応する。また、 C_0 は逆バイアス印加直後の容量であり、これは零バイアス時にトラップにとらえられた電子がまさに放出し始める直前の状態に対応する。(1)式に与えられる接合容量の過渡的变化を検出するために、Lang⁽¹⁾ はダブルボックスカーを用いている。図2 (c) にはダブルボックスカーを用いた場合の測定原理が示されている。ダブルボックスカーの出力は図2 (b) で表わされる接合容量と図2 (c) の波形をかけたもの、すなわち $C(t_1) - C(t_2)$ で与えられる。(2)式からわかるように、 τ は低温では長く、温度上昇とともに短くなる。従って、図2(a) のようにくり返し多数キャリアパルスを加えつつ接合の温度を上昇させる時 $C(t_1) - C(t_2)$ は低温および高温では零となり、その間のある温度で $C(t_1) - C(t_2)$ は最大値をとる。 $C(t_1) - C(t_2)$ が最大となる条件は次式で与えられる。

$$\tau_m = (t_1 - t_2) \ln\left(\frac{t_1}{t_2}\right)^{-1} \quad (3)$$

従って、 t_1 と t_2 を変えて測定すれば(3)式を満足する温度がそれぞれ求まり、 τ の温度依存性が得られ、これから深い準位の位置が得られる。また、 $C(t_1) - C(t_2)$ の最大値は $\Delta C = C_{\infty} - C_0$ に関係し、次式より深い準位の濃度が求まる。

$$\frac{\Delta C}{C_{\infty}} = \frac{N_t}{2 N_s} \quad (4)$$

ここで、 N_t は深い準位の濃度、 N_s はドーパント濃度である。同じ目的のためKimerling⁽⁴⁾ はロックインアンプを用いている。図2 (d) にはロックインアンプを用いた場合の測定原理が示されている。ロックインアンプの出

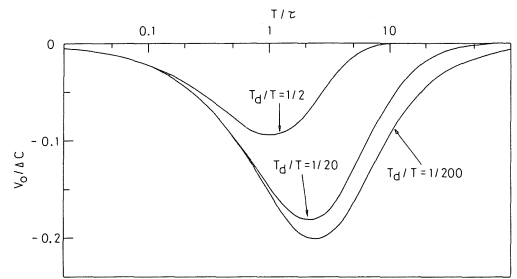
力は、図2 (b) で示される接合容量と図2 (d) で示される波形をかけ合わせたものとなる。計算を行なうとロックインアンプの出力は次式で与えられる。

$$V_o = \frac{(C_1 - C_\infty)T_1}{T} + \frac{4C}{T/\tau} \left\{ \exp\left(\frac{T_1}{\tau}\right) - 1 \right\} - \frac{4C}{T/\tau} \exp\left(\frac{T_1}{\tau}\right) \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{T}{2\tau}\right) \right\}^2 \quad (5)$$

ここで、 T_1 は零バイアスの期間であり、深い準位が電子でうめられている状態に対応し、 C_1 はこの時の接合容量である。そして C_1 はエネルギー帯図では図1 (a) に対応する。また、 T は多数キャリアパルスの周期であり、この周期と同じでありデューティ比が50%の方形波が参照信号としてロックインアンプに与えられている。図2 (b), (d) からわかるようにロックインアンプを用いた場合接合容量が過渡的に変化している部分のみならず零バイアス時の接合容量も出力として現われる。このため(5)式には C_1 および T_1 が含まれている。 T_1/T を設定して(5)式の第3項を T/τ に対して計算すると、第3項はある T/τ で最大値をとるような関数であり、また出力としては負になる。同様に計算すると第2項は T/τ とともに、すなわち温度とともに増加する関数であり、出力としては正となる。一方、(5)式の第1項を評価するためには C_1 と C_∞ がわかっていなければならない。しかしながら C_1 や C_∞ は試料や加えるバイアス条件によって変わる。定性的には、第1項は正となり T/τ とともに、すなわち温度とともに増加する。以上より、一般的に(5)式において V_o が最大となる条件およびその最大値を評価することはできないことがわかる。実験上ではその都度 C_1 や C_∞ を評価すればよいのであるが、これは極めて不便である。ロックインアンプを用いて行なう最も良い実験方法は第1項が無視できるように T_1/T を十分に小さくすることである。この時には第2項も小さくなり(5)式は第3項のみで近似的に表わされる。しかしながらこの条件は試料やバイアス条件によって変わる。さらに T_1/T を小さくするために T を長くすると積分時間が長くなり実験を行なうには不都合である。図2(c)からわかるようにダブルボックスカーを用いれば零バイアスの間かけ合わせる波形を零とすることができるのでこのような問題は生じない。我々はロックインアンプを用いる場合に生ずるこのような問題を解決するため図2(e)に示される波形を用いることを提案する。すなわち、原理的にはロックインアンプと同じであるが零バイアスの間はかけ合わせる波形を零とする。ここで零バイアスの期間から連

続してかけ合わせる波形においてさらに零である期間 (T_d) を設定したのは用いるキャパシタンスメーターの応答を考慮するためである。また、バイアスが零である期間の前にさらにかけ合わせる波形において零である期間 (T_d) を設定したのも同じ理由による。ロックインアンプを用いる場合はこのようなことはできず、ロックインアンプの出力にキャパシタンスメーターの応答は悪い影響を与えるものと考えられる。ダブルボックスカーの場合は我々が提案したのと同様、 T_d , T_d を設定できる。我々が提案した波形を用いると出力は次式で与えられる。

$$V_o = -\frac{4C}{T/\tau} \exp\left(-\frac{T_d}{\tau}\right) \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{T}{2\tau}\right) \right\}^2 \quad (6)$$



第3図 T/τ に対して計算された V_o 。 V_o は (6) 式で与えられる。

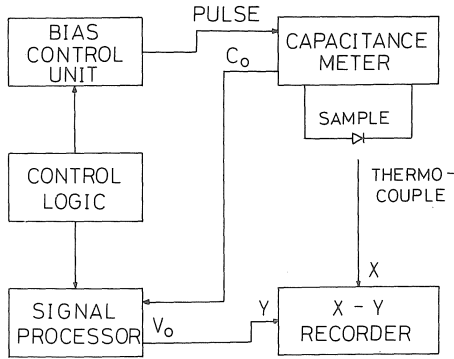
ここで T は積分区間である。図3には T_d/T をパラメータとして T/τ に対して計算された V_o が示されている。図3からわかるように V_o がある T/τ で最大値をとることがわかる。また、 T_d/T が大きくなるにつれて最大値をとる T/τ は小さくなり、その最大値は減少することがわかる。例えば、 T_d/T が一定の条件のもとで T を変えればそれに対応して V_o が最大となる τ が変化し、それぞれの τ に対して V_o が最大となる温度が求まり、 τ の温度依存性が得られ、これよりトラップの欠陥準位が評価できる。また、 V_o の最大値より ΔC が求まり、(4)式よりトラップの濃度を得られる。

今までは多数キャリアトラップを考えてきたが少数キャリアトラップも同様にして考えることができる。深い準位を多数キャリアでうめるために零バイアスを用いたが少数キャリアでうめるためには順バイアスを用いる。他は多数キャリアトラップの場合と同じである。この時接合容量の変化は(1)式で与えられるが多数キャリアトラップの場合 $\Delta C = C_\infty - C_0$ は正であるが少数キャリアトラップの場合 ΔC は負となる。⁽¹⁾従って(6)式からわかるように V_o は多数キャリアトラップに対しては負の最大値をとるのに対して、少数キャリアトラップに対しては正の

最大値をとる。このようにして多数キャリアトラップと少数キャリアトラップを区別できる。⁽¹⁾

3. 実験方法

図4には、我々が提案した測定原理を実現するために製作された測定回路のブロック図が示されている。コン



第4図 我々が提案した測定原理を実現するための測定系。

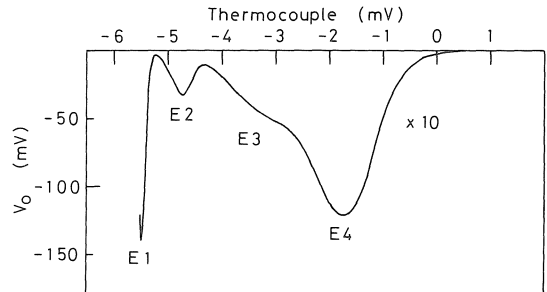
トロールロジックでクロックパルスを作り、このクロックパルスの周期を T_{ck} とすると積分期間 T は $T=200T_{ck}$ 、 T_d は $T_d=T_{ck}(100-D)$ で与えられるように設計されている。ここで、 D は1から99までの整数で変化できる。バイアスコントロールではダイオードに印加されるバイアスパルスが作られ、キャパシタンスメーター（ブント社製モデル72BDキャパシタンスメーター）を通して試料に加えられる。この時の接合容量の変化はキャパシタンスメーターのアナログアウトとして検出され、これがシグナルプロセッサで積分され、その出力がX-YレコーダのY軸に与えられる。試料はクライオスタットに入れられ、液体チッ素温度より室温まで温度変化を与える。温度は銅-コンスタンタン熱電対で測定され、熱起電力はレコーダのX軸に与えられる。

実際に実験を行なう場合、 T を変えても出力の形が変化しないように T_d/T を一定条件にするのが望ましい。この目的のため、 T と T_d は T_{ck} に比例して変化するように設計されている。我々が用いたキャパシタンスメータの応答時間は数ms程度である。実験により $T_d=5$ msであればキャパシタンスメーターの応答の問題は解決できることがわかっている。なお、 T_d は7ms固定になっている。この時、例えば $T_d/T=1/20$ ($D=90$)一定条件で実験を行なえば、46.5ms以上の τ を設定できる。しかしながら、より浅い準位を検出するためにはより短い τ を設定する必要がある。このためには $T_d/T=1/2$ ($D=0$)とすればこの測定系で実現できる最も短い $\tau=9.5$ msを設定で

きる。しかしこの時、図3からわかるように出力の最大値は減少し、検出感度は悪くなる。これらの問題を解決するためには T_d を短くする、すなわちより応答の速いキャパシタンスメーターが必要となる。一方、長い τ には原理上制限はない。しかしながら長い τ を設定するにつれて積分時間 T は長くなり、実験を行なうにはあまり長い τ は不都合である。以上より、これらの問題を把握して実験を行なう必要がある。

4. 実験結果および検討

中性子照射された SiP^{+n} ダイオードに対して、我々が提案した測定原理が適用された。図5にその実験結果を示す。用いた試料のドーパント濃度は $3.2 \times 10^{15} \text{cm}^{-3}$ である。



第5図 我々が提案した測定原理の適用例。用いた試料は中性子照射された SiP^{+n} ダイオードであり、照射量は $3 \times 10^{14} \text{neutron/cm}^2$ である。 $\tau=46.5$ msに設定され $T_d/T=1/20$ の条件であり、逆バイアスは6Vである。

中性子は立数大学原子力研究所トリガIIリアクターにより室温で照射され、照射量は $3 \times 10^{14} \text{neutron/cm}^2$ である。 τ は46.5msに設定され、 $T_d/T=1/20$ の条件である。逆バイアスは6Vで、零バイアスの区間 T_1 は10msである。測定温度範囲は液体チッ素温度より室温付近までで、測定時間は1時間程度である。図5において3つの明瞭なピークが観測される。また、熱起電力 ~ 3 mV付近で曲線の傾きが変化している。これは、この付近で小さなピークがあることを暗示している。これから中性子照射されたりn型Siには4つの準位が導入されたことがわかる。これを、 E_1 、 E_2 、 E_3 、 E_4 とする。ピークの電圧値より ΔC が求められ、 E_1 、 E_2 、 E_4 の欠陥濃度はそれぞれ 6.1×10^{14} 、 1.4×10^{14} 、 $5.3 \times 10^{14} \text{cm}^{-3}$ と評価された。 E_3 は大きなピーク E_4 のため明瞭なピークとならず欠陥濃度は評価できない。我々はすでにn型Siには中性子照射により3つの準位が導入されることを報告している^{(5),(6)}。これらは今観測された E_1 、 E_2 、 E_4 と対応すると考えられる。我々が製作した回路ではノイズを考慮してドーパント濃度の0.1%程度までの欠陥濃度を検出できることがわかった。

このようにして、この方法は各々の欠陥に対応してピークが観測され（スペクトロスコピックな性質）、また検出感度も良く、測定時間も短いため、深い準位を研究するための有効な手段であることがわかる。現在、欠陥準位を求めめるため、 τ を変えた実験を行なっている。

5. まとめ

半導体中の深い準位を検出するための一方法が提案された。この方法はpn接合に印加されるバイアス電圧が急激に変化した時、深い準位の荷電状態の変化により接合容量が変化するという現象に基づく。我々が提案した方法は、この接合容量の過渡的变化を検出するために用いられたロックインアンプによる方法をさらに改善したものである。我々の提案した方法が解析された。また、そ

の方法を実現するための測定回路が製作され、中性子照射されたSi p⁺nダイオードに対して適用された。その結果我々が提案した方法は、深い準位を検出するための有効な手段であることが示された。

謝 辞

日頃より有益な御指導と御援助を頂いている本学竹松英夫先生、大阪大学工学部犬石嘉雄先生、名古屋工業大学宇佐美晶先生に感謝致します。また、回路製作の際御討論頂いた名古屋工業大学大学院生清水信行氏に感謝致します。さらに、試料の中性子照射の際非常に御世話になりました立教大学原子力研究所高見保清先生、小林久夫先生に感謝致します。

参考文献

- (5)D. V. Lang : J. Appl. Phys. 45 (1974) P.3023
- (2)C. T. Sah : Solid-State Electron. 19 (1976) p. 975
- (3)G. L. Miller , J. V. Ramirez, and D. A. H. Robinson :
J. Appl. Phys. 46 (1975) P. 2638
- (4)L. C. Kimerling : IEEE Trans. Nucl. Sci. NS-23
(1976) P. 1497
- (5)Y. Tokuda and A. Usami: J. Appl. Phys. 47 (1976)
p. 4952
- (6)Y. Tokuda and A. Usami : J. Appl. Phys. 48 (1977)
p. 1668