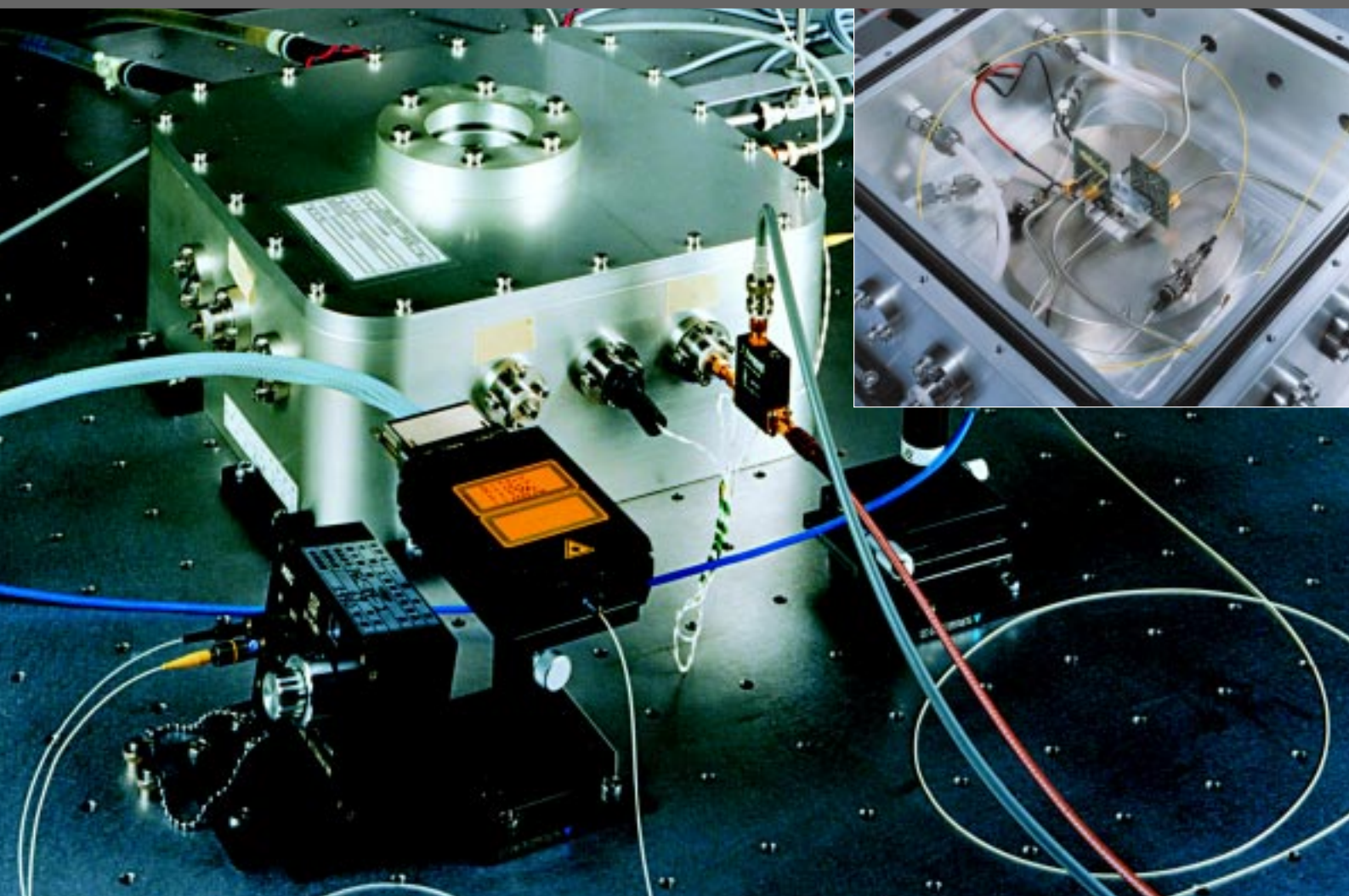


ETL NEWS



電総研ニュース

1550nm 帯単一光子検出器を開発

高温水素アニールにより 4H-SiC MOSFET の界面
準位密度の低減 / チャネル移動度の向上に成功

X線と線用線量計の校正について

受賞・講演会・その他

2000.11 vol.610

1550nm 帯単一光子検出器を開発

- 30% 以上の量子効率を達成 -

Single-photon Detector for 1550nm Photons with a Quantum Efficiency Exceeding 30%

光技術部 創造フォトニクスラボ
Optoelectronics Division, Creative Photonics Lab.

We report a gated-mode single-photon detector highly sensitive to 1550nm photons using a thermoelectrically cooled indium-gallium-arsenide avalanche photodiode. Under near room-temperature operation at -35°C , we have obtained a quantum efficiency exceeding 30% while keeping the dark-count probability per gate as small as 10^{-3} .

1 はじめに

光ファイバーネットワークの充実とインターネットの普及が現代社会に与える影響は大きく、情報・サービスの内容も多種多様化している。しかしながら、インターネットバンキングや電子商取引では、口座番号やパスワード等、機密性の高い個人情報を送受信するため、盗聴防止やプライバシー保護が必要不可欠になる。現代暗号は盗聴されても解読に時間を要することで安全性を確保しているが、急速な技術革新を考慮すればその根拠は曖昧である。このため、現在、IT革命と称される次世代情報産業分野の社会的・経済的発展に対して通信の安全確保が極めて重要な課題となっている。これに対して、量子暗号や量子テレポーテーション等、量子力学(特に、量子光学)の特異性を活かした光通信・情報処理技術が最近注目され、量子光学を工学的立場から積極的に利用する研究が盛んになっている。量子暗号の特徴は、単一光子の非分割性や量子状態の複製禁止則を基礎とした盗聴検出法にあり、盗聴に無防備な現代暗号と比較すれば極めて安全で信頼性の高い光通信ネットワークを構築することができると考えられている。現在までに、様々な暗号化手順が提案され、原理検証実験も行われているが、光ファイバーの低損失波長帯(1550nm付近)で適当な感度を有する単一光子検出器が存在しないため、光ファイバー伝送による量子暗号通信技術の開発は非常に遅れている。また、市販されているシリコンアバランシェフォトダイオード(Si-Avalanche Photodiode、APDと略記)や光電子増倍管による単一光子検出では波長1550nm付近に感度がなく、光ファイバーネットワーク系への応用は不可能である。

当所では、工業技術院特別研究「量子相関フォトニクスに関する研究」において、コヒーレント光では実現できない次世代の光通信・計測技術の確立を目標にした光ファイバー通信波長帯における相関光子対の発生・制御・検出技術の開発を行っている。波長1550nm帯に感度を有する単一光子検出器は相関光子対を効率良く検出するために必要不可欠な光デバイスであり、高感度・低雑音化が強く求められている。また、量子暗号通信や量子テレポーテーション等、将来の量子光通信分野への応用も考慮すると、室温動作で簡便な検出器の開発が望ましい。さて、ゲルマニウムAPDを使用すれば光ファイバーの零分散波長帯(1300nm付近)で単一光子を効率よく検出することができるが、波長1450nmを境に感度が急激に低下するため波長1550nm帯での使用は困難である。そこで、波長1550nm付近に感度を有するインジウム・ガリウム・砒素(InGaAs)系APDを使用することになるが、これまでに報告されている単一光子検出器では量子効率が低く(20%以下)、液体窒素による極低温動作(-60°C 以下)を要するため光通信分野には不向きであった^{1,2)}。

本研究では、光ファイバーの低損失波長帯(1550nm付近)において高感度な単一光子検出を行うため、InGaAs-APDによるゲート動作型単一光子検出器の開発を行った。液体窒素冷却の代わりにペルチェ素子による電子冷却を導入して動作温度を -35°C とし、従来に比べて室温に近い動作を可能にした。暗計数率の増加を抑制するため、低暗電流タイプのAPDと短ゲート時間(=1ns)を採用し、高感度化と低雑音化を図った。その結果、電子冷却型で量子効率32%、暗計数率 10^{-3} 程度の単一光子検出器の開発に成功した。

2. ゲート動作型単一光子検出器

図1に示すように、検出回路をプリント基板上に作製した。APDにはあらかじめ降伏電圧 V_{break} より僅かに小さな直流電圧が印加され、バイアス-Tで矩形電圧パルスが重畳される。単一光子検出の原理・手順は以下の通りである。

- 1 降伏電圧 V_{break} より僅かに小さな直流電圧をAPDに印加する。
- 2 直流電圧に矩形電圧パルスを重畳して V_{break} より大きな電圧をAPDに与え、単一光子をAPDに入射する。
- 3 光子吸収で電子・正孔対が生成されるが、APD内部に存在する強電界により正孔は十分に加速され、格子衝突により他の電子を価電子帯から伝導帯に上げる。更に、格子衝突により次々に自由電子が作られAPD電流が劇的に増大(なだれ現象)する。
- 4 なだれ現象により増大した電流を観測して、単一光子検出を行う。
- 5 APDに印加する電圧を手順1の状態に戻してなだれ現象を終了させる。

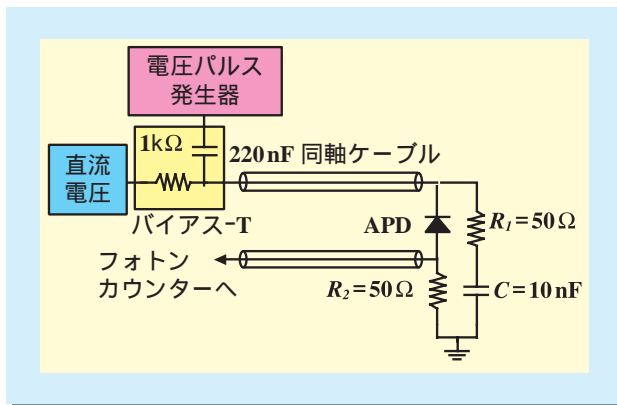


図1 ゲート動作型単一光子検出器の回路構成

さて、手順1から5を繰り返して周期的に単一光子検出を行うが、矩形電圧パルスが検出器のゲート(門)を開閉することから、以下では、矩形電圧パルスをゲート信号、図1の構成をゲート動作型単一光子検出器と呼ぶことにする。同図に示すように、同軸ケーブルとの整合から陰極を整合抵抗 R_1 と直流ブロックコンデンサ C 経由で接地した。更に、なだれ現象により増大した電流を電圧変換して伝送させるために陽極も出力抵抗 R_2 経由で接地した。なお、手

順3において正孔が十分に加速された後、格子衝突によりなだれ現象が発生するため、ゲート信号を不変とすれば量子効率 η はAPDに印加する直流電圧の大きさに比例する。但し、熱電子放出など光子吸収以外の原因でなだれ現象が発生する確率も電圧増加とともに増大するため、量子効率と暗計数率はトレードオフの関係にある。図2は量子効率・暗計数率測定システムであるが、APDは水冷式二段ペルチェ素子で冷却される。結露防止のため容器を真空中に保つが、動作温度は238K(-35°C)である。また、光源から波長1552nm、半値全幅23ps、周波数200kHzの光パルスが出力され、ゲート信号と同期している。同図に示すように、光パルスを可変光減衰器で単一光子レベルまで減衰させた後、光ファイバ経由でAPDに送るが、なだれ現象検出には波高弁別機能と計数機能を併せ持つフォトンカウンターを使用し、1ゲート当たりのなだれ発生確率 $P_{avalanche}$ を測定する。また、光源を取り除けば、暗計数率 $P_{dark-count}$ も測定することができる。

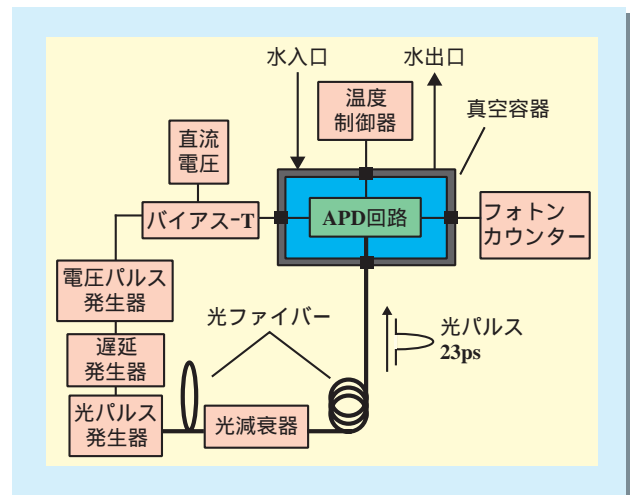


図2 量子効率・暗計数率測定システム

3. 量子効率・暗計数率測定

前節で示したゲート動作型単一光子検出器の量子効率と暗計数率の測定を行うため、まず、波高弁別を行うために必要なしきい値を設定する。図3中の赤線は同軸ケーブルを伝送した光誘起によるなだれ電圧パルスの観測例である。また、青線は光誘起されない場合の観測例である。測定条件は、降伏電圧 $V_{break}=49.3V$ 、直流電圧 $V_{dc}=46.5V$ 、ゲート電圧 $V_{ac}=9.76V$ であるが、APD自身が持つ微小な容量による充電パルス(位置:A)が光誘起によるなだれ電圧パルス(位置:B)の有無に関わらず存在するため、後

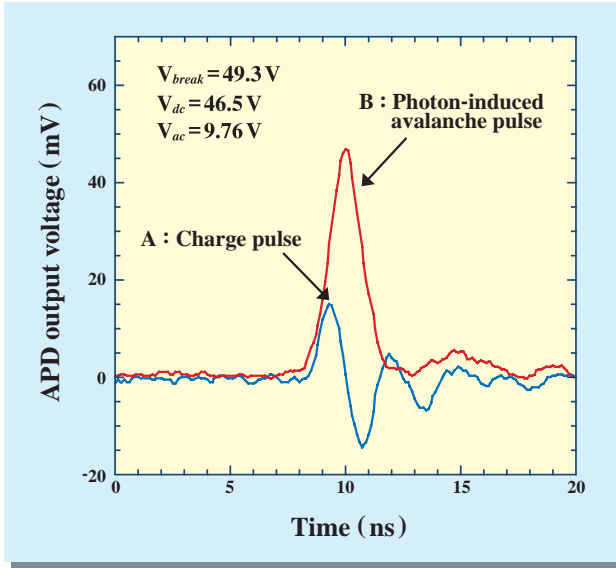


図3 アバランシェフォトダイオード出力光誘起パルス有り(赤線) 無し(青線)

者のみが正しく計数されるようにしきい値を設定する必要がある。同図では、光誘起によるなだれ電圧パルスのパルス幅はゲート動作における矩形電圧パルスのパルス幅(=1ns)よりも若干広がっているが、これは使用した測定器の帯域制限に起因するものであり、実際には、なだれ電圧パルスと矩形電圧パルスのパルス幅は一致する。図4にしきい値となだれ発生確率 $P_{avalanche}$ (赤丸) 暗計数率 $P_{dark-count}$ (青丸) の関係を示すが、しきい値が10mV以下ではフォトンカウンタが過って充電パルスを計数している。これを避

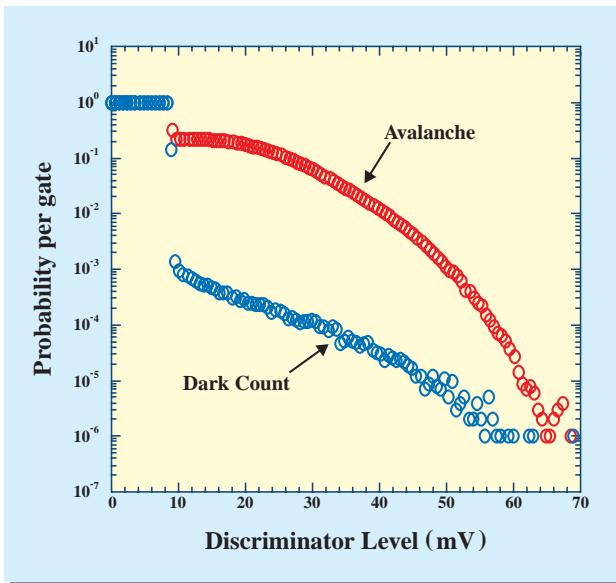


図4 なだれ発生確率(赤丸)と暗計数率(青丸)のしきい値依存性

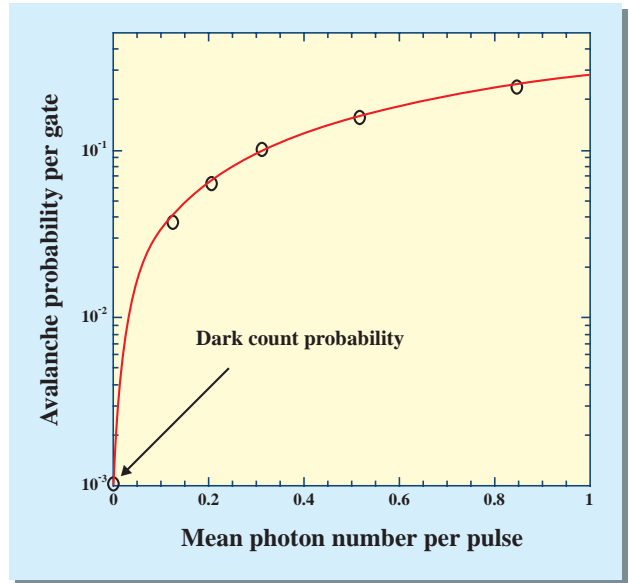


図5 なだれ発生確率の平均光子数依存性
測定値(黒丸) 補間曲線(実線)

けるために、 $P_{avalanche}$ と $P_{dark-count}$ の差が最大となる場所付近にしきい値を設定することが望ましく、以下では、しきい値を20mVと設定した。図5にAPDに入射した光パルス1個当たりの平均光子数 n となだれ発生確率 $P_{avalanche}$ の関係を示す。黒丸は実測値であり、実

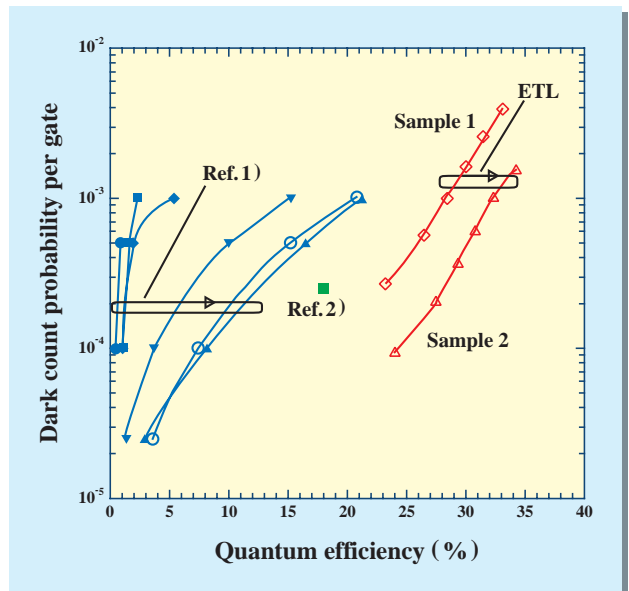


図6 量子効率と暗計数率の比較

電総研(ETL) : (238K, -35°C)
 参考文献1) : (97K)・(123K)・(146K)・(174K)・(198K)・(223K)
 参考文献2) : (210K)
 但し、括弧内数値は動作温度

線は量子効率 η を含む理論関数³⁾

$$P_{\text{avalanche}} = 1 - (1 - P_{\text{dark-count}}) \exp(-\eta n) \quad (1)$$

による補間曲線である。この場合、補間結果から $\eta=0.32$ を得るので、量子効率を 32% と見積もることができる。次に、APD に印加する直流電圧を変化させながら量子効率 η と暗計数率 $P_{\text{dark-count}}$ を順次測定して両者の関係を調べた。図 6 に 2 個のサンプルを使用した測定結果を示すが、前述の通り、量子効率と暗計数率はトレードオフの関係にあることが明確に確認された。曲線は見やすさのために引いたものであり、比較のために、他グループ^{1,2)} が開発した単一光子検出器の諸性能(量子効率・暗計数率・動作温度)も併せて示した。同図に示すように、我々の検出器は動作温度が高いにもかかわらず、高量子効率と低暗計数率を実現している。

4 .まとめ

波長 1550nm 帯で高感度な単一光子検出を行うため、インジウム・ガリウム・砒素系アバランシェフォトダイオードによるゲート動作型単一光子検出の開発を行った。液体窒素冷却の代わりにペルチェ素子による電子冷却を採用したため、動作温度が -35°C と従来に比べて高温となった。暗計数率を抑えるため、低暗電流タイプのアバランシェフォトダイオードの使用と短ゲート時間の採用により、高感度化と低雑音化を図った。この結果、量子効率 32%、暗計数率 10^{-3} 程度の単一光子検出器の開発に成功した。本検出器は光ファイバー低損失波長帯において高感度・低雑音であることから、将来実現が期待される光ファイバー伝送による量子暗号等において誤り率の低減や伝送距離の延伸等に極めて有効であると思われる。今後は一層の性能向上と量子相関を利用した光干渉計測や量子暗号通信技術への応用を図る予定である。

参考文献

- 1) G.Ribordy, J.-D.Gautier, H.Zibinden, and N.Gisin, "Performance of InGaAs/InP avalanche photodiodes as gated-mode photon counters", Appl. Opt., vol.37, 2272 (1998).
- 2) M.Bourennane, F.Gibso, A.Karlsson, A.Hening, P.Jonsson, T.Tsegaye, D.Ljunggren, and E.Sundberg, "Experiments on long wavelength (1550nm) "plug and play" quantum cryptography systems", Opt. Express, vol.4, 383 (1999).
- 3) B.F.Levine, C.G.Bethea, and J.C.Campbell, "Near room temperature $1.3\mu\text{m}$ single photon counting with a InGaAs avalanche photodiode", Electron. Lett., vol.20, 596 (1984).

研究課題

工業技術院特別研究
量子相関フォトンクスに関する研究

用語説明

暗計数率(dark count probability)

単一光子検出器において熱電子放出など光誘起以外の原因で計数される誤り計数率。

降伏電圧(breakdown voltage)

アバランシェフォトダイオードにおいてなだれ現象を発生させるのに最低限必要な印加電圧。

零分散波長(zero-dispersion wavelength)

波形歪みがなくファイバー中を伝搬できる光パルス波長。

量子暗号(quantum cryptography)

光子や電子などが持つ量子力学的特性を利用して盗聴検出を行い、安全性の高い暗号鍵分配技術を実現する技術。

量子効率(quantum efficiency)

単一光子検出器では光子 1 個を検出する確率。

量子相関(quantum correlation)

2 つ以上の光子や電子などが任意の距離隔てた所に位置するとき互いに相関を持つことができる性質。

量子状態の複製禁止則(no-cloning theorem)

光子や電子などが持つ量子状態をコピーしてクローン(複製)を作ることが許されない規則。

量子テレポーテーション(quantum teleportation)

ある量子状態を任意の距離隔てた所に伝送して再構築する技術。

ラボメンバー (Lab. Members)

吉澤 明男 (Akio Yoshizawa)	光技術部 (Optoelectronics Division)
e-mail:yosizawa@etl.go.jp	
土田 英実 (Hidemi Tsuchida)	光技術部 (Optoelectronics Division)
遠藤 道幸 (Michiyuki Endo)	光技術部 (Optoelectronics Division)

高温水素アニールにより 4H-SiC MOSFET の 界面準位密度の低減 / チャネル移動度の向上に成功

Improvement of the Device Performance for 4H-SiC MOSFETs using High-Temperature Hydrogen Annealing

材料科学部 ハードエレクトロニクス・ラボ
先進パワーデバイス研究室
Materials Science Division, Hard Electronics Lab.
Advanced Power Devices Lab.

The interface state density (D_{it}), the channel mobility and the flat band voltage shift of 4H-SiC MOS structures were measured in order to investigate the effect of high-temperature hydrogen annealing on interface properties, and the device performance of 4H-SiC MOSFETs. As a result, it was found that high-temperature hydrogen annealing above 800°C decreased the D_{it} and the threshold voltage, resulting in the improvement of the channel mobility. Therefore, high-temperature hydrogen annealing is very useful for improvement of the device performance for 4H-SiC MOSFETs.

1 .緒言

炭化珪素 (SiC) は、高破壊電圧、高飽和電子速度、高熱伝導度のような優れた物理的性質を有するために、理論的には Si デバイスよりもオン抵抗を約 2 桁小さくできる。また、SiC デバイスは高温での使用が可能であり、冷却系を省くことにより、制御系素子を小型化して自動車に搭載することにより、電気自動車の実現を促進すると期待される。研究が進み SiC を送電用の電力変換素子に用いられるようになれば、2030 年に予想される電力損失のうち 580 万 kW を削減できると試算されている。また、これらのすべては、二酸化炭素の削減にも寄与するので、SiC 電力素子は、省エネルギー、環境用電力素子として、あらゆる面で注目されている。また、電力分野だけでなく、SiC デバイス素子は、21 世紀においては、携帯電話の無線基地局の急激な増大に代表される情報化社会におけるインフラにおいて、高信頼性、省エネルギーのキーデバイスとしての重要性が着目されている。SiC 電力素子は、PiN ダイオードやショットキーバリアダイオード (SBD) などの整流素子と金属 - 酸化膜 - 半導体電界効果型トランジスタ (MOSFET) や接合型トランジスタのようなスイッチング素子を組み合わせたモジュールとして使用される。このうち、SBD のオン抵抗は、すでに、ほぼ SiC の理論値まで下がることが報告されており、ドイツのメーカーが信頼性試験や歩留まりのデータを公表するなど、着実にビ

ジネス展開へ向けて進んでいる。一方、MOSFET は、オン抵抗が小さくスイッチング速度が速いために、スイッチング素子として期待されている。しかし、SiC のパワー MOSFET のオン抵抗は、Si のパワー MOSFET のそれをわずかに下回った程度であり、理論的に予想される値よりはるかに大きい。これは、オン抵抗の大部分を MOSFET のチャネル抵抗が占めるのに、その向上が極めて難しい問題となっているからである。MOSFET のチャネル移動度を向上することが、パワー MOSFET のオン抵抗を下げるための緊急の課題となっている。SiC MOS 構造の界面準位密度 (D_{it}) は、Si MOS 構造のそれよりも約 1 桁高く、このことが SiC MOSFET の低チャネル移動度の重要な原因と考えられている。そのため、SiC MOSFET の分野においては、界面準位密度を低減する技術に関する研究に世界中の注目が集まっている。

我々は、当所に設けられた先進パワーデバイス研究室において、「超低損失電力素子技術開発」プロジェクトを、新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の委託を受けた新機能素子研究開発協会 (FED) との共同研究として実行している。このプロジェクトにおいては SiC の結晶成長からデバイス作製の要素技術や評価技術まで広範囲に研究している。プロセス要素技術の一つとして、MOS 界面制御技術がある。SiC の酸化速度は、Si のその約 1/100 であり非常に遅いので、最高温度 1300°C でドライ酸化、パイロジェニッ

ク酸化ができ、その他、水素ガス、不活性ガスによるアニールが可能な超高温酸化炉を作製して、MOS界面制御技術を体系的に調べた。その結果、高温水素アニールを用いてSiC MOS構造の界面準位密度を低減する技術を開発した。さらに、4H-SiC MOSFET作製プロセスを確立して、水素アニールによるチャネル移動度の向上を確認したので報告する。

2 .SiC MOS 界面制御技術

Si MOSFETの作製においては、400°Cの水素アニールで、Siの P_b センターと呼ばれるダングリングボンドを終端することにより、 D_{it} を減少して良好な界面を形成することが行われる。しかし、Leuven大学のAfnas'ev氏等により6H-SiC MOS構造においては、400°Cでの水素アニールがMOS構造のC-V特性に影響を与えないことが報告されている。一方、電力中研の土田氏等は、ATRフーリエ変換赤外分光法で6H-SiC表面を1000°Cの水素中でアニールすることによりSi-HとC-H振動による吸収信号を観測した。この事実は、高温水素アニールにより酸化膜形成後の SiO_2/SiC 界面に存在するシリコンあるいは炭素のダングリングボンドが終端されて、界面準位密度が減少することを示唆している。そこで我々は、高温水素アニールが D_{it} とチャネル移動度に与える影響を体系的に調べた。その結果、高温水素アニールが、 D_{it} を下げかつチャネル移動度を向上することを発見した。

3 .MOS 構造作製プロセス

実験に使用したn型エピタキシャル4H-SiC(0001)基板(オフ角度:8°、有効キャリア密度: $1 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$)は、Cree Research社から購入した。まず、標準的なRCA洗浄が行われた。次いで、10nmの犠牲酸化膜をドライ酸化法で形成した後、5%フッ酸水溶液で除去した。約50nmの厚さのゲート酸化膜を、1200°Cにおいてドライ酸化で形成した。酸化後のアニールの効果を調べるために室温まで急速冷却した試料(a)、(c)とアルゴン中で30分間のアニールを行った試料(b)、(d)、計4試料を作製した。次いで、試料(c)、(d)については、1000°C、30分の水素アニールを行った。さらに、水素アニール温度の効果を調べるために、試料(b)と同じ方法で作製された試料を400°Cから1000°Cにおいて水素中で30分間のアニールした。最後に、ゲート電極とオーミックコンタクトを形成するために、アルミニウムをMOS構造のゲート酸化膜上と基板の裏面に蒸着した。高周波と準静的C-V特性は、

シールドされた箱の中で室温において測定した。 D_{it} は、後述するhigh&low法を用いて算出した。

4 .MOSFET 作製プロセス

MOSFETの作製には、p型エピタキシャル4H-SiC(0001)基板(オフ角度:8°、有効キャリア密度: $5 \times 10^{15} \text{cm}^{-3}$)を用いた。基板をRCA洗浄した後に、ソース/ドレイン形成のためのイオン注入及び活性化アニールが行われた(ドーズ量: $7 \times 10^{15} \text{cm}^{-2}$ 、活性化アニール:1500°C、5分間)。次いで、1200°Cで140分間のドライ酸化により40nmのゲート酸化膜を形成した後に、アルゴン中で1200°C、30分間アニールを行った。さらに、水素アニールの効果を調べるために、試料の一つは、800°Cで30分間の水素アニールを行った。ゲート電極とソース/ドレインへのオーミックコンタクトはアルミニウムを蒸着することにより形成した。

5 .高温水素アニールによる界面準位密度の低減

図1に試料(a)、(b)、(c)及び(d)の容量-電圧(C-V)特性を示す。高周波C-V特性(実線)は、100kHzで測定された。準静的C-V特性(破線)は、スイープ速度が0.01V/sで測定された。高周波特性から算出された試料(a)、(b)、(c)及び(d)のフラットバンド電圧シフトは、各々、11.8V、1.9V、-1.7V、-1.4Vであった。酸化後の冷却条件が ΔV_{fb} へ大きく影響することがわかる。試料(a)の大きな ΔV_{fb} は、界面に多量の界面準位が存在していることを示している。この ΔV_{fb} は、アルゴンアニールにより減少する。一方、水素アニールした後の ΔV_{fb} は、負電圧である。したがって、 $SiO_2/4H-SiC$ 界

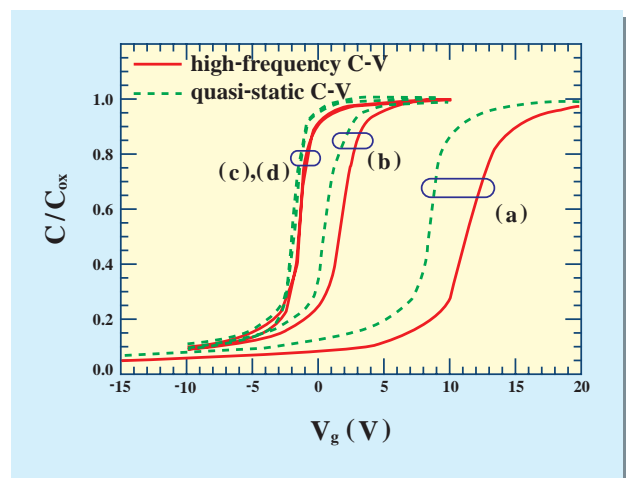


図1 試料(a)、(b)、(c)及び(d)のC-V特性

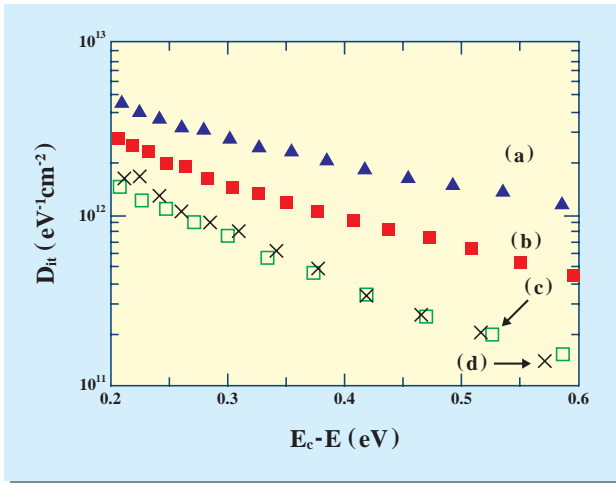


図2 試料(a)、(b)、(c)及び(d)のD_{it}の伝導電子帯からのエネルギー分布

面がSiO₂中に正電荷が存在している。図2は、D_{it}の伝導電子帯からのエネルギー分布を示す。D_{it}は、high&Low法により、以下の式から算出された。

$$D_{it} = q^{-1}[(C_q^{-1} - C_{ox}^{-1})^{-1} - (C_h^{-1} - C_{ox}^{-1})^{-1}] \quad (1)$$

ここで、qは電荷、C_h、C_q、C_{ox}は、各々、単位面積当りの高周波容量、準静的容量、酸化膜容量を示す。試料(b)のE_c-E = 0.6eVにおけるD_{it}は、4×10¹¹eV⁻¹cm⁻²であり、試料(a)の約半分である。したがって、アルゴンアニールは、D_{it}の低減に有効であることがわかる。しかし、水素アニールをする前のSiO₂/SiC界面状態は全く異なっているにもかかわらず(試料(a)、(b))、試料(c)、(d)のC-V特性とD_{it}は、ほとんど同じである。特に、試料(c)、(d)のE_c-E = 0.6eVにおけるD_{it}は、試料(b)のD_{it}の約1/4である。したがって、水素アニール

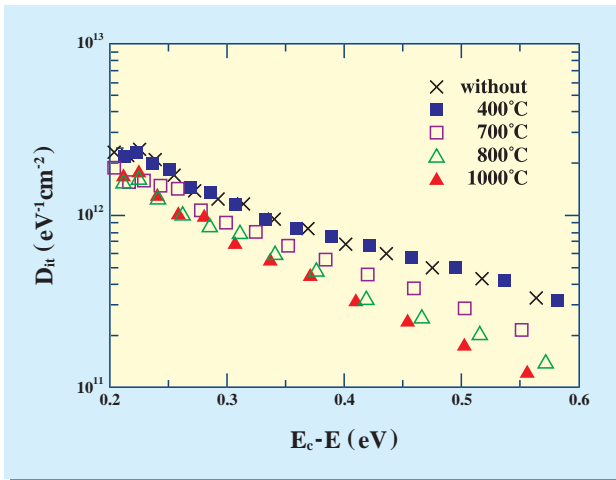


図3 D_{it}に対する水素アニール温度依存性

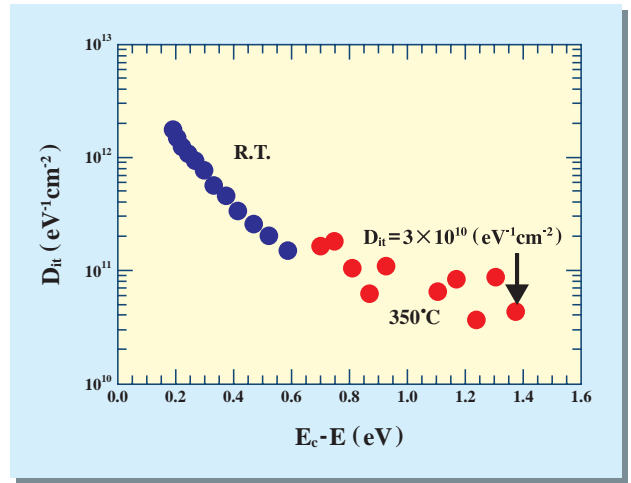


図4 試料(c)のD_{it}のミッドギャップ近傍までのエネルギー分布
室温(R.T.)と350 で測定された

は、D_{it}の低減に非常に効果的であることがわかる。

図3に400°C~1000°Cで水素アニールされた4H-SiC MOS構造のD_{it}のエネルギーバンドギャップ内の分布を示す。比較のためにアルゴン中でのみアニールされた試料のD_{it}も示してある(図中 without)。400°Cの水素アニールでは、D_{it}は、アルゴンアニールのみの場合とほとんど変わらない。Si MOS構造と異なり400°Cの水素アニールは、D_{it}の減少に対して有効でない。400°Cより高温において、水素アニール温度が上昇するにつれて、D_{it}は減少して800°C付近で飽和する。図4に室温(R.T.)と350°Cで測定したC-V特性から算出したSiC MOS構造のミッドギャップ近傍でのD_{it}分布を示す。ミッドギャップ近傍で3×10¹⁰eV⁻¹cm⁻²である。この値は、現在までに報告された中で最も低い。SiC MOS構造のD_{it}は、炭素あるいはシリコンの

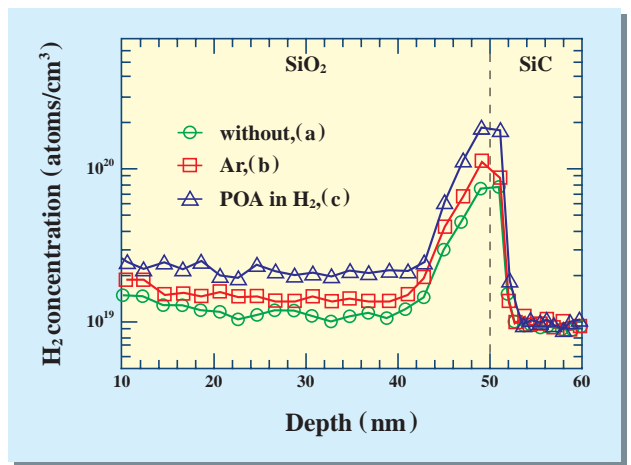


図5 SIMSで測定された水素の深さプロファイル

ダングリングボンド、あるいは、SiCの酸化過程において発生した残留炭素と界面付近の炭素クラスターに起因していると考えられている。図5に二次イオン質量分析法(SIMS)で測定されたMOS構造の水素の深さプロファイルを示す。この結果と図2は、SiO₂/4H-SiC界面の水素濃度が増加するにつれてD_{it}が減少することを明らかにした。したがって、高温水素アニールによるD_{it}の低減は、水素原子によりSiO₂/SiC界面にあるSiあるいはCのダングリングボンドあるいは、炭素クラスターによる界面準位が終端されることに起因していると考えられるが、そのメカニズムの解明にはさらに詳細な研究が必要である。

6 .高温水素アニールによるチャネル移動度の向上

図6にチャネル移動度(μ_{ch})の測定に用いられた4H-SiC MOSFET (ゲート長(L_g)10 μ m/ゲート幅(W)50 μ m)の光学顕微鏡写真を示す。図7にゲート電圧(V_g)9Vと12Vでのドレイン電流(I_d)のドレイン電圧(V_d)依存性に対する水素アニール効果を示す。I_dは0Vから急激に増加しており、コンタクト抵抗の影響の少ない良好なオーミック特性を示している。図8にV_d=0.1VでのI_dと相互コンダクタンス(G_m)のゲート電圧依存性に対する水素アニール効果を示す。G_mは、V_gに対するI_dの増加率である。水素アニールにより閾値電圧(V_{th})が小さくなり、G_mが増加している。これは、 μ_{ch} が向上していることを示している。式(2)、(3)から算出した線形領域(V_d=0.1V)と飽和領域(V_d=10V)での μ_{ch} と式(3)から算出したV_{th}を表1にまとめる。水素アニールによりV_{th}は、約1/3になり、 μ_{ch} は、約3割増加(V_d=0.1)する。これは、高温水素アニールにより、SiO₂/SiC界面準位密度が減少してV_{th}が小さく

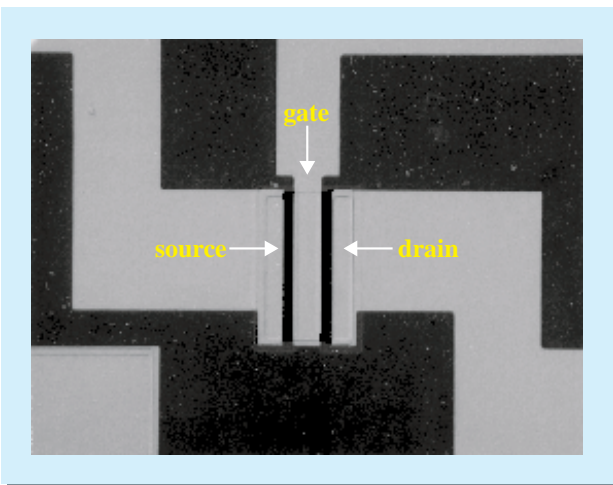


図6 SiC MOSFETの光学顕微鏡写真

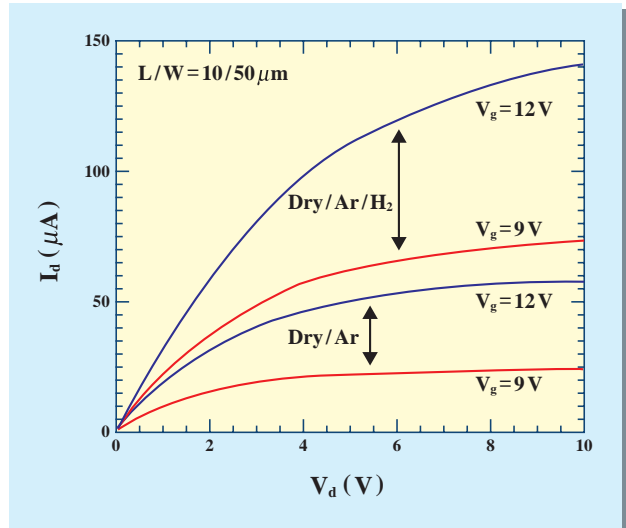


図7 Id-Vd 特性に対する水素アニール効果

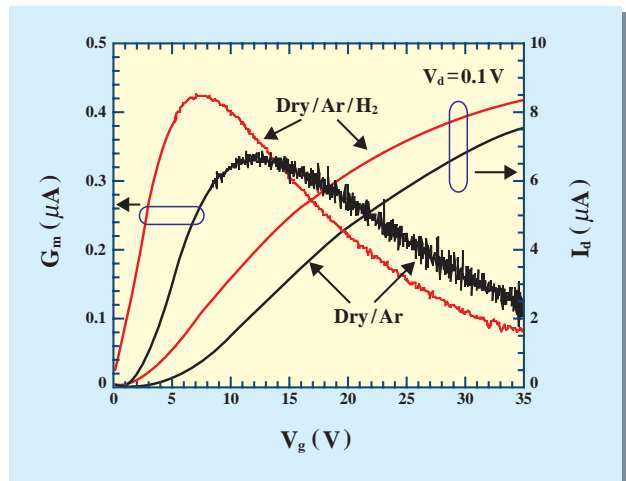


図8 Id、Gm-Vg 特性に対する水素アニール効果

なり、 μ_{ch} が向上すると考えられる。

$$\mu_{ch} = G_m \cdot L_g / W \cdot C_{ox} \cdot V_d \quad (2)$$

$$\mu_{ch} = 2 \cdot L_g \cdot I_d / W \cdot C_{ox} \cdot (V_g - V_{th})^2 \quad (3)$$

ここで、C_{ox}は、酸化膜容量である。

	チャネル移動度 (cm ² /Vs)		閾値電圧
	V _d =0.1V	V _d =10V	
Ar	5.8	3.9	3.6V
Ar+H ₂	7.4	4.4	1.5V

表1 チャネル移動度と閾値電圧に対する水素アニールの効果

7.まとめ

「超低損失電力素子技術開発」プロジェクトで実行している4H-SiC MOSFET界面形成/チャンネル移動度向上技術について報告した。我々は、SiC MOSFETの作製プロセスを確立すると同時に、良好なSiO₂/SiC界面形成のための要素技術を検討した結果、高温水素アニールによりミッドギャップ近傍で $D_{it} = 3 \times 10^{10} \text{eV}^{-1} \text{cm}^{-2}$ となる良好なSiO₂/SiC界面を形成することに成功した。さらに、SiC MOSFETを作製して、高温水素アニールによりチャンネル移動度が約30%向上することを確認した。本技術は、SiC パワー MOSFET のオン抵抗を低減するために有効な技術であると考えられる。

研究課題名

「超低損失電力素子技術の研究」プロジェクト

ラボメンバー (Lab. Members)

福田 憲司 (Kenji Fukuda)

e-mail:kfukuda@etl.go.jp

鈴木 誠二 (Seiji Suzuki)

趙 元珠 (Won-ju Cho)

小杉 亮治 (Ryoji Kosugi)

先崎 純寿 (Junji Senzaki)

原田 信介 (Shinsuke Harada)

田中 知行 (Tomoyuki Tanaka)

荒井 和雄 (Kazuo Arai)

材料科学部 (Material Science Division)

先進パワーデバイス研究室 (Advanced Power Device Lab.)

先進パワーデバイス研究室 (Advanced Power Device Lab.)

先進パワーデバイス研究室 (Advanced Power Device Lab.)

先進パワーデバイス研究室 (Advanced Power Device Lab.)

先進パワーデバイス研究室 (Advanced Power Device Lab.)

先進パワーデバイス研究室 (Advanced Power Device Lab.)

材料科学部 (Material Science Division)

X線とγ線用線量計の校正について

Calibration of Dosimeters for X and γ Rays

量子放射部 放射線標準ラボ
Quantum Radiation Division, Radiation Standard Lab.

Hereafter at ETL, dosimeters for X and γ rays will be calibrated using the unit of kerma as well as exposure. The conversion factors for converting exposure to kerma are obtained for X and γ ray standard fields at ETL from the values of W/e and g . The values have been accepted at the meeting of CCEMRI(I)-1985.

放射線場について考える時、空間の各点における放射線の強度を示す尺度が必要である。従来、X線やγ線などの光子放射線については、照射線量という量が使用されてきた。照射線量は、ある点において、仮にそこに空気が存在すると仮定した場合、光子によって空気の単位質量当たりから放出される電子（陽電子を含む）が、空気中で完全に静止するまでに生成される正負のイオンの一方の極性の電荷の絶対値である。従って照射線量のSI単位はC/kgである。照射線量は、1気圧、0°Cの空気、1cc当たりから放出される電子によって生成されるイオンの電荷量に由来して決められたR（レントゲン）という単位で表されることも有る。

空間における放射線の強度を示す量として、カーマ（kerma : Kinetic Energy of charged particles Released in Material）という量も有る。カーマは、ある点において、直接、光子や中性子のような電荷を持たない放射線によって、物質の単位質量当たりから放出される電子やイオンなどの荷電粒子の初期運動エネルギーである。従ってカーマのSI単位はJ/kgである。

放射線による種々の効果について考える時に、共通な尺度として使用できる量として、吸収線量がある。吸収線量は、放射線照射によって、対象としている物質が単位質量当たり吸収するエネルギーである。従って吸収線量のSI単位はカーマと同じJ/kgであり、これらの量の単位には、Gy（グレイ）と言う共通した特別な名称が与えられている。

この様にカーマは、吸収線量と物理的な内容は異なる量であるが、単位が同じばかりでなく、場の強度を示すカーマの値と、その場に置かれた物質が放射線によって与えられる吸収線量の値は、多くの場合、近いものとなる。このことから最近、光子放射線に対して、照射線量の代わりに、空気によるカーマの値が

使用される場合が増えてきた。現在、一次標準の国際比較は全て空気カーマで行われており、国内においても、放射線障害防止法関係法令において空気カーマが近く取り入れられることになっている。

当所は従来、X線やγ線用の線量測定器を、C/kgあるいはR単位による照射線量で校正を行ってきた。今後は校正依頼者の指定により、Gy単位の空気カーマによっても校正を行う。

照射線量は、自由空気電離箱あるいは空洞電離箱による電荷信号と、これらの電離箱内の空気の質量を測定し、種々の補正を加えることによって得ることができる。空気カーマの値は照射線量から次のようにして得ることができる。

気体中に放出された電子のエネルギーを、その電子によって気体中に生成される正負のイオン対の数で割ったものは、W値と呼ばれる。W値はイオン対1個を生成するのに費やされる平均エネルギーと考えることができる。電子に対する空気のW値は、電子エネルギーが数keV以上の場合、ほとんど一定であると見なすことができる。従って、C/kg単位の照射線量の値をイオン1個の電荷である電気素量で割れば空気1kg当たりから発生する電子によって生成されるイオン対の個数となり、これにW値を掛ければ、空気1kg当たりから発生する電子の初期運動エネルギーに等しくなる。

しかし厳密には、X線やγ線によって放出された電子のエネルギーの一部は、制動X線として失われる。この制動X線が空気に再吸収されて生成されるイオンの電荷は、電離箱によって測定される電荷には含まれておらず、また、照射線量の定義でも除外されている。一方、W値は制動X線の再吸収によって生成されるイオンを含むとして定義されている。従って、照射線量から電子の初期運動エネルギーの正確な値

光子エネルギー (MeV)	水	空気	炭素
0.05	0.42×10^{-4}	0.54×10^{-4}	0.16×10^{-4}
0.10	0.16×10^{-3}	0.18×10^{-3}	0.14×10^{-3}
0.2	0.39×10^{-3}	0.44×10^{-3}	0.35×10^{-3}
0.3	0.63×10^{-3}	0.71×10^{-3}	0.57×10^{-3}
0.4	0.86×10^{-3}	0.97×10^{-3}	0.78×10^{-3}
0.5	1.09×10^{-3}	1.23×10^{-3}	0.99×10^{-3}
0.6	1.31×10^{-3}	1.48×10^{-3}	1.20×10^{-3}
0.7	1.54×10^{-3}	1.73×10^{-3}	1.41×10^{-3}
0.8	1.76×10^{-3}	1.99×10^{-3}	1.62×10^{-3}
0.9	1.99×10^{-3}	2.24×10^{-3}	1.84×10^{-3}
1.0	2.23×10^{-3}	2.50×10^{-3}	2.06×10^{-3}
1.25	2.83×10^{-3}	3.17×10^{-3}	2.63×10^{-3}
1.5	3.38×10^{-3}	3.86×10^{-3}	3.22×10^{-3}

表1 CCEMRI(1985)によって合意された光子エネルギーに対する各物質中でのgの値

を得るためには、この制動X線として失われるエネルギーに対する補正が必要である。

W値を電気素量で割った W/e と、制動X線として失われるエネルギーの割合である g については、各国標準機関で使用すべき値が、1985年の、国際度量衡

委員会の下に設置されている電離放射線諮問委員会 (CCRI、当時はCCEMRI) 第1部会において合意されている¹⁾。即ち、 $W/e = 33.97 \pm 0.05 \text{ J/C}$ であり、 g については、水、空気、炭素の各物質中での値を表1に示す。空気中での値については、国際放射線単位測定

光子エネルギー (MeV)	空気
1.0	1.00
1.5	0.996
2.0	0.995
3.0	0.991
4.0	0.988
5.0	0.984
6.0	0.980
8.0	0.972
10.0	0.964

表2 ICRU(1992)による(1-g)の値

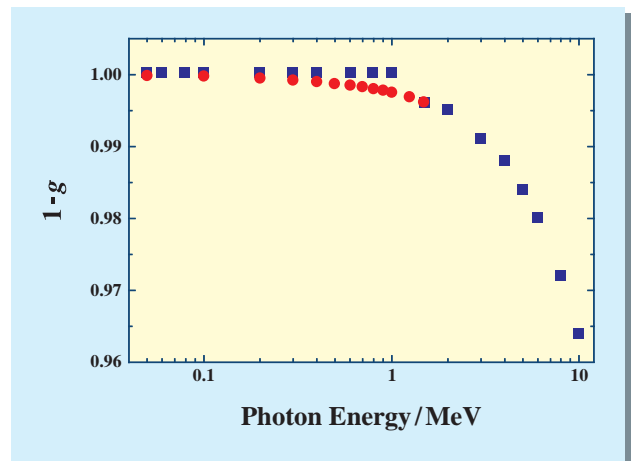


図1 光子によって空気中で発生した電子のエネルギーの内、制動X線として失われる割合 g を $(1-g)$ の値として示したもの。

: CCEMRI(1985)による値

: ICRU(1992)による値

委員会 (ICRU) も $(1-g)$ の値として発表している²⁾。これらの内、エネルギーが 1MeV 以上の光子に対する値を表 2 に示す。ICRU は、全ての $(1-g)$ の値を 3 桁表示としているため、値が 1.00 となる光子エネルギー 1MeV 以下の場合と、それより高エネルギーの場合で、値の精度が異なっている。CCRI と ICRU による値を光子エネルギーに対する $(1-g)$ の値として図 1 に示す。我が国の工業規格である放射線関連の JIS においては、ICRU の値が採用されることになっている。

当所においては現在、コバルト 60 が発生する 2 本の γ 線の平均エネルギーである 1.25MeV 以下の光子について線量計の校正を行っている。当所における空気カーマによる標準場の設定は、CCRI において合意された値を採用する。即ち、空気カーマの値は、光子放射線標準場における照射線量の値に、 $W/e = 33.97 \text{ J/C}$ の値を掛け、表 1 に掲載した空気中での g の値から、それぞれの標準場における光子エネルギースペクトルに対して得られる平均値 $(1-\bar{g})$ の値で除して得られる値とする。従って、当所において照射線量で校正された校正値を空気カーマによる校正値に変換する場合や、その逆の変換を行う場合は、当所の各標準場に対して算定された $(1-\bar{g})$ の値を用いなければならない。

参考文献

- 1) CCEMRI 1985 BIPM: Com Cons Etalons Mes Ray Ionisants, 11, R 157-158 (1985)
- 2) ICRU Report 47 (1992)

ラボメンバー (Lab. Members)

高田 信久 (Nobuhisa Takata)	量子放射部 (Quantum Radiation Division)
e-mail:ntakata@etl.go.jp	
小山 保二 (Yasuji Koyama)	量子放射部 (Quantum Radiation Division)
関口 広美 (Hiromi Sekiguchi)	量子放射部 (Quantum Radiation Division)
黒澤 忠弘 (Tadahiro Kurosawa)	量子放射部 (Quantum Radiation Division)

受賞

石毛龍之介氏が勲四等瑞宝章を受章

(元 電波電子部長)

(平成 12 年 11 月 3 日)



(電総研での功績)

石毛氏は、昭和 26 年 3 月に北海道大学工学部電気工学科卒業後同年 4 月当所に入所、標準器部第二標準器課高周波計測研究室研究員として、高周波インピーダンス標準の研究に着手し、数々の優れた研究業績を上げると共に、我が国のマイクロ波・高周波標準の確立に貢献し、その普及に努めた。また、当時、欧米各国の標準研究所との間で実施された各種電気標準に関する国際比較に積極的に参画し、我が国の電気計測技術の優秀性を示すと共に、各種電気標準量の国際的な統一に向けて対外的指導性を発揮した。さらに、我が国が推進する国際的研究協力事業の一環として、発展途上国におけるマイクロ波・高周波の精密計測技術に関する技術指導や研究協力に積極的に参画し、各国の技術力向上に多大な貢献をした。

特に、高周波インピーダンスに関する一連の研究成果は、戦後の我が国におけるマイクロ波・高周波に関する精密計測技術のレベル向上に寄与すると共に、電力、電圧、電流、雑音、減衰量、移相量、インピーダンスなどのマイクロ波・高周波標準の体系構築に大きく貢献し、国際的にも高い評価と信頼を得た。その研究成果の一部は産業界に導入され、現在でも広く活用されている。

昭和 39 年 2 月より 1 年間、科学技術庁長期在外研究員として米国の国立標準研究所(NBS)に滞在し、マ

イクロ波と高周波標準に関する研究を行うと共に、米国電気電子学会(IEEE)主催の精密同軸コネクタ委員会において、同氏の専門分野である精密コネクタの規格、精密測定法の確立に貢献し、併せて相互比較の実施に協力した。

昭和 41 年 3 月からは企画課長補佐を併任し、電気試験所から電子技術総合研究所への移行直前における所全体の運営や研究マネジメントの円滑化に貢献した。

昭和 43 年 4 月、標準器部高周波研究室長に就任。高周波・マイクロ波標準全般に関する研究に精励すると共に、後進の指導に当たった。特に、当時問題となった電子レンジからの電磁波漏洩問題に関して、評価法を検討すると共に評価に必要な電磁界強度標準の確立を行った。さらに、マイクロ波の生体効果について調査を行った。

昭和 46 年 10 月から 1 年間企画室長を併任し、所全体の研究企画・調整に携わった。企画室長退任後も、筑波移転に際して標準施設の充実のため、精密空調装置($\pm 0.1^{\circ}\text{C}$)、非磁性室、非磁性棟、大無響室、大残響室等の企画と設計を担当し、移設計画全体について企画室長時代より 8 年半の長きにわたり関与し、多大な貢献をした。

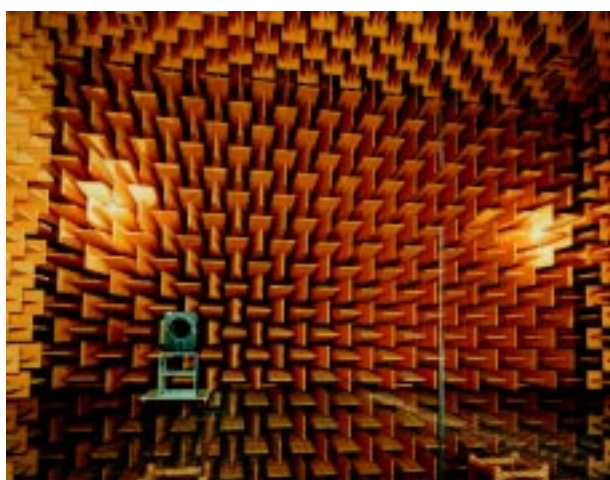
昭和 47 年 11 月に量子技術部長、昭和 49 年 10 月には標準計測部長、昭和 56 年 3 月からは電波電子部長と要職を歴任し、光・放射線、電気・音響、レーザーおよび高周波の各標準分野にわたる研究の管理指導を行った。

この間、電気諸量に関して従来の標準抵抗・標準電池を基本とする体系から、クロスキャパシタとジョセフソン電圧標準を基とする新電気標準システムを研究し、国家標準の精度を 1~2 桁向上させることに成功した。この方式は電気分野に初めて量子標準をシステムの基として採用した点で画期的なものである。さらに、次世代標準計測技術として、電気と力学量(長さ、質量等)との単位系のずれをゼーマン効果を利用してより精密に結びつける方式を研究すると共に、クロスキャパシタに変わるもう一つの量子標準の可能性を持つ量子ホール効果を利用した新しい抵抗標準の研究開発に着手した。

さらに、超音波標準の新設、騒音公害の精密計測、量子化磁束検出器による生体からの微弱磁界の高感

度測定技術の研究開発についても産業界に対して指導を行った。

昭和56年12月に退官し、昭和57年2月に株式会社光電製作所顧問、昭和58年6月には技術部長、同8月に常務取締役、昭和60年6月に株式会社コーデン研究所代表取締役所長、昭和62年6月には株式会社光電製作所多摩川事業所長を併任し、吸収媒質中の電



無響室

磁波の伝搬に関する研究を通じて、同社の海中通信、地中探査技術の事業化に貢献した。

平成3年6月に同社を退職後は、北見工業大学に講師として平成7年9月まで勤務した。この間、海洋計測技術調査専門委員会委員、電波航行用受信機調査専門委員会委員、海洋隔測システム技術調査委員会委員等を歴任した。



非磁性棟

特別記念講演会開催される

2000.11.1

創立110周年を迎え、また2001年4月には独立行政法人産業技術総合研究所として再出発することになるため新たな飛躍を目指して、「情報・エネルギー・エレクトロニクス・計測標準技術の過去・現在・未来」と題する電子技術総合研究所特別記念講演会が、11月1日にグランドアーク半蔵門において開催されました。参加者は産業界をはじめ、学・協会関係、工業技術院、当所OBなどの方々320名でした。

当日は、児玉所長の110年におよぶ電総研の歴史の概略とその継承の精神などについての挨拶の後、「電総研における研究開発の変遷」との統一テーマで、棟上昭男東京工科大学教授（元情報アーキテクチャ部長）による「情報処理技術」、松本元理化学研究所グループディレクター（元首席研究官）による「パイオ情報処理技術」、堀米孝日本クリーンエネルギー総合研究所理事長（元エネルギー部長）による「エネルギー技術」、片岡照榮シャープ株式会社社友（元電子デバイス部長）による「エレクトロニクス技術」、根本俊雄明治大学教授（元基礎計測部長）による「計測

標準技術」と題する講演が行われ、当所の幅広い技術分野での研究開発の変遷が紹介されました。

棟上氏は、これまで当所が取り組み、産学官が一体で行って来た計算機関連のプロジェクトの内容紹介や研究者の心構えなどについて、松本氏は、脳の情報処理と従来のコンピュータの情報処理の違いを克服して、如何に脳型のコンピュータをつくりあげるかについて楽しい話を紹介されました。また、堀米氏はエネルギー技術や電力の送配電技術のこれまでの変遷や、当所が技術的に主導して来たムーンライト計画、サンシャイン計画、ニューサンシャイン計画などについて概観されました。片岡氏は、セラミックコンデンサーとしてのチタコンやフェライト、シリコン、アモルファス材料など電子材料の研究での当所の果たした役割、IC、LSI、超LSI、磁気センサーなどの電子回路系における研究開発に係わる当所の主体性、光産業開拓育成など幅広い分野に亘り、これまで、当所が産業界と共同で開発して来た多くの事例や今後のIT革命への対応策などについて紹介されました。

根本氏は、標準の歴史の他に、計測標準の在り方や基本的考え方、重要性、国際的な協調、物理量との関係について分りやすく解説されました。

午後の部では、前半に森英夫三菱電機株式会社社友(元所長)による「電気試験所から電子技術総合研究所へ - 今日の情報化社会を展望した電子・情報技術の研究体制の確立 -」、菊池誠東海大学名誉客員教授(元電子基礎特別研究室長)による「トランジスタ黎明期の電子基礎研究と21世紀への期待」と題する特別講演が行われました。

森氏は、如何にして当所がエレクトロニクスやコンピュータ、バイオ関連で世界的にリードすることが出来たか、また、リード出来なかったことは何かなどについて時代背景の変遷と共に語られました。菊池氏は、コンピュータやエレクトロニクスの主役としてのトランジスタの黎明期における当所の果たした役割や、当時の世界の開発動向について話されました。トランジスタをトランジスタとして動作させるためには当時の日本の技術分野における意識の変革が必要であったこと、さらに、当所は米国で発明されたトランジスタを日本の技術で再現したが、米国のトランジスタ発明がそうであったように、それまで世界的に誰も知らなかったことを世の中に出現させて分かるようにするには、さらに大きな飛躍が必要であることを如実に語っていただきました。2つの特別講演では日本の情報化社会への開拓の歴史と、情報化社会の到来を予測しての研究体制の確立とについてエピソードを交えて講演され、さらに今後の発展への期待が述べられました。

後半では、「新産業創出のための研究開発とは - 新体制での研究展開 - 」と題して、大蒔和仁情報アーキテクチャ部長、河野憲二首席研究官、大和田野芳郎工

ネルギー部長、伊藤順司電子デバイス部主任研究官、小林直人量子放射部長、小柳正男電子基礎部長によるパネルディスカッションが行われました。ここでは、情報、脳、エネルギー、エレクトロニクス、光、計測標準の各技術分野で今後どのように研究を展開するのか、また、なぜ日本のノーベル賞受賞者数は米国などに比べて圧倒的に少ないのか、国際競争力とは何かなど、会場からのコメントも交え、熱心に話し合われました。コーディネータの太田公廣産学官連携推進センター長は、菊池氏のトランジスタ開発に関する講演に触れて、産業技術総合研究所が世界レベルの研究所になるためには、関連する全ての組織や部署がそれを達成するレベルになる必要があり、産学官連携の仕事もそこにあるだろうと締め括りました。

最後に、2000年プロジェクト実行委員長である神本次長による当所の110年におよぶ技術や研究の歴史の骨格に有る、「創造」する精神は今後とも継承されて行くであろうとの閉会挨拶があり、特別記念講演会は終了しました。



特別講演(菊池誠氏)



特別講演(森英夫氏)



パネルディスカッション

当所大阪ライフエレクトロニクス研究センターならびに大阪工業技術研究所、計量研究所大阪計測システムセンター、地質調査所大阪地域地質センターの合同開催による工業技術院研究所関西地区講演会が11月8日、池田市民文化会館大ホールにおいて開催されました。

本年の講演会は、平成13年4月から「独立行政法人産業技術総合研究所」へ移行することに伴い、「新法人・関西拠点における今後の展開」- 人間・生活環境科学、電子・光技術と計量、地質の取り組みから - と題して開催され、特別講演を含む計8件の講演を行いました。



講演中の外池総括主任研究官

当所からは、大阪ライフエレクトロニクス研究センター外池光雄総括主任研究官が、「ライフエレクトロニクス研究・技術開発の新しい展開 - 個性化と高齢化社会への適用に向けて - 」と題した研究発表を行いました。

また、当所の児玉皓雄所長が閉会の挨拶を行い、関係各位に対し今後の関西地区での活発な研究協力を要請しました。

いずれの講演も終始熱心に聴講され、参加者は産学官あわせて518名に達し成功裡に終了しました。



閉会の挨拶を述べる児玉所長

10月27日～28日までの2日間、福井県産業会館(福井市)を主会場に「北陸技術交流・テクノフェア2000」(主催:技術交流・テクノフェア実行委員会)が開催されました。

本フェアは、産学官の技術交流を目的として開催されたもので、当所などの国立研究機関をはじめ、大学、企業等150団体が出展し、最新の研究・開発の成果について、実演や展示が行われました。当所からは大阪ライフエレクトロニクス研究センターより「高度難聴者のための超音波補聴器開発」に関する研究成果を出展しました。この技術は聴覚障害者のための画期的技術であり、来場者の注目を集めました。



ヌグバネ南アフリカ芸術・文化・科学技術大臣来訪

2000.10.24

10月24日、ヌグバネ南アフリカ芸術・文化・科学技術大臣一行8名が当所を訪問されました。

はじめに、所長から当所の概要について説明がなされ、引き続き最新の研究成果の中から、「自己健康管理支援システム」(知能システム部:西田 佳史研究員)の研究について担当者が説明を行いました。



人事異動

氏名	(新)	(旧)
平成12年10月25日付		
座間 達也	企画室開発班長の併任解除 企画室開発班開発係長の併任解除 企画室企画班の併任解除	量子放射部主任研究官兼企画室開発班長兼 企画室開発班開発係長兼企画室企画班
永見 武司	企画室の併任解除 企画室開発班長に併任 企画室開発班開発係長に併任	知能情報部兼企画室
村山 泰	企画室企画班に併任	基礎計測部主任研究官
平成12年11月1日付		
高畠 一哉	情報科学部に併任 期間は平成13年3月31日まで	中国工業技術研究所生産基礎技術部知能制御研究室主任研究官

編集 〒305-8568 茨城県つくば市梅園 1-1-4 工業技術院 電子技術総合研究所 0298(61)5059

表紙写真: 単一光子検出器(真空容器内部)及び評価装置

URL <http://www.etl.go.jp/> e-mail: info@etl.go.jp

印刷・製本 ニッセイエプロ株式会社