

1995(第11回)日本国際賞受賞者 1995(11th) Japan Prize Laureate



ニック・ホロニアック・ジュニア博士
(アメリカ合衆国)

Dr. Nick Holonyak, Jr.
(U.S.A.)

イリノイ大学・センター・フォア・
アドバンスド・スタディー教授、
ジョン・バーディーン職教授

Professor, Center for Advanced
Study, John Bardeen Chair
Professor, University of Illinois

材料プロセス技術分野

授賞対象業績：

化合物半導体の物理的原理の洞察及びプロセス技術に基づく創造的業績を通しての発光ダイオード及びレーザーなど、オプトエレクトロニクスにおける基礎研究並びに実用化に対する顕著な貢献

Materials Processing Technologies

Reasons for Award:

For outstanding contributions to research and practical applications of light emitting diodes and lasers through pioneering achievements in the understanding of physical principles and in the process technology of intermetallic compound semiconductors.

イリノイ大学教授 1928年11月生まれ

ホロニアック博士は、1951年以来半導体プロセス技術の研究を続け、現在世界中で使われているシリコン・コントロールド・レクチファイアを開発した。

1960年以降、自ら開発した化合物半導体プロセス技術による発光ダイオードを、また1962年には可視光の半導体レーザーの実現に世界で初めて成功した。

その後、半導体の禁制帯幅並びに格子定数を独立に制御するなど今日のオプトエレクトロニクスの道を拓き、初めて高性能な室温連続発振の量子井戸構造レーザーの開発にも成功した。以上のように、同博士は、世界を変えたオプトエレクトロニクスにおける基礎研究及びその実用化に抜群の貢献をした。

Dr. Nick Holonyak, Jr. started his research on semiconductor process technology in 1951. In 1957 he made great contributions in the areas of silicon devices, including his invention of the Silicon Controlled Rectifier(SCR). SCRs are now widely used in the world.

Since 1960 he focused his research on intermetallic compound semiconductors, and he tried unique methods in process technology for crystal growth and p-n junction formation. His outstanding work from 1960 to 1962 led to the commercial introduction of GaAsP light emitting diodes(LED). He was the inventor of the first practical LED. In 1962 he succeeded in making the first visible light semiconductor laser.

He extended his research to develop ternary and quaternary compound semiconductors, and he was the first to succeed in independently controlling two factors, i.e., energy gap and lattice constant for preparing devices. This achievement was a key contribution to the growth of modern optoelectronics.

He was the first(1978) to achieve continuous room temperature operation of a laser with quantum-well-structure.

Dr. Holonyak's outstanding achievements ranging from research to practical developments on light-emitting diodes and lasers gave continuous stimulus and remarkable enrichment both to related physics and technology.

シリコンから化合物半導体へ：発光ダイオード及びランプ ニック・ホロニアック・ジュニア

BardeenとBrattainによってトランジスタが発見され（1947年12月16日）、又Bardeenによって少数キャリアの注入が確立されて以来、半導体が集中的に研究され又実際現在我々を取り巻いている集積回路（ICs）やコンピュータを含む全く新しい驚くべきエレクトロニクスの基礎として役立つ様になる事が実質的に自然の成り行きとなったのである。最初はBardeenの慎み深さから当時のトランジスタは原価が高いために或種の特定の応用に対しては有用になるだろうが、低価格の真空管が使われている広い用途に対しては競争にならないだろうと考えていた。私達は今この初期の慎み深い意見に対して微笑むことが出来る。Bardeenは又彼が死ぬ少し前に次の様に話していた（Holonyakに）。1952年9月に創設したかつての彼のUrbanaの半導体研究室で仮に間違いがあったとしても、それでも結晶と種々の材料に関する研究にそれ以上力を注ぐという事にはならなかったであろう。この事は彼が1952年2月にノート・ブックに書いた様に、SiはGeよりもっと重要であり、又単一表面、単一の参照面からの不純物拡散がトランジスタを作る「正しい」道である事を彼が知っていた事を考え合わせると皮肉な事である：事実この研究所では不純物拡散更に反転層の量子サイズ効果を含む表面及び界面の研究が行なわれた。Bardeenは電界効果デバイスの反転層の利用に関する基本特許を持っていた事を述べるのは有意義な事と思う（トランジスタの特許がファイルされる以前にファイルされている）。この事は表面チャンネルに於ける電荷注入及び後の量子サイズ効果を確立する際に彼が何故間違いをおかさなかったかを考えるヒントになる。

当時結晶を開発する初期の段階であった

為に、初期のトランジスタの研究は元素材料であるGe及びSiをもとにしたものになったのは避け難い事であった。こうしてこれらの間接遷移ギャップ（長いキャリア寿命）を持つ結晶が最初に研究される様になった。Siの場合についていえば、これらの研究は私達が知っている様に今でも続いている。例えばSi上の酸化膜とそのトランジスタへの利用が40年間も続いている事を私達は知っているし、今でも又これからも更に小さい小さいそして稠密に集積されるデバイスに向かって、おそらく最終的には量子サイズ効果の段階に達する迄継続され拡大さえするだろうと思われる。私達はこの事が如何に重要であるか分かっており、勿論、酸化膜で規定したSiデバイスについて一度でも仕事をした事のある私共すべての人々の大きな誇の源である。

トランジスタに関する結晶と材料の研究の中から、縮退したドーピングでは急峻なp-n接合がトンネル現象を起こし、負性抵抗を示す事がSonyで（1958年、江崎）示された。Ge及びSiのトンネル・ダイオードの限界からIII-V族半導体及びその材料の研究が興味を集める事になり、実際、それは直接的にIII-V族の気相エピタキシー（VPE）を、そして高いp-n接合電圧を求めて早くも1960年にはGaAs_{1-x}P_xの気相合成によるエピタキシーを招来させる事になった。・・・時あたかも、実際、エピタキシャルGe及びSiトランジスタが最初に開発された時の事である。

基本概念である「injection」（キャリア注入）の確認によって、ようやく電流駆動の半導体（初期のSiC）が何故光を発するのかを理解出来る様になった。これは古くてしかもよく分かっていなかった現象であった。III-V材料への興味の転換（1959-60）とこれ

らの系でのp-n接合の研究（トンネル接合、可変容量素子など）は又III-V発光素子の研究へとその方向を向ける事になった。一研究学派は50年代後半及び60年代初期にそのエネルギー・ギャップが大きい（2.26eV、緑）という理由によって、その間接遷移ギャップ・バンド構造とその効率の悪さを無視してGaPの研究に焦点を合わせた。他の研究者達はエネルギー・ギャップの低さ（1.4eV、赤外）にも拘らず、トランジスタ材料としての将来性を考えてGaAsにこだわった。

Znを拡散したGaAsの可変容量接合素子が光信号伝送に成功裡に使われた時（Rediker他、1962）、Device Research Conference（1962年7月）の一部の参加者達は直接遷移ギャップを持つIII-V結晶、即ちGaAs（或いはGaAs_{1-x}P_xですら！）がレーザーの基盤である事を意味しているものと解釈した。1962年の終りまでに4つのグループがp-n接合半導体レーザーを実現することに成功した（Hall他、GaAs；Nathan他、GaAs；Holonyak GaAs_{1-x}P_x；Quist他、GaAs）。半導体レーザーはそれ自身重要である、しかしそれを越えてこの事は直截的に如何に直接遷移ギャップ半導体が光放出に対して赤外だけでなく可視光に対しても重要であるかを明らかにした。逆に、間接遷移ギャップ結晶（GaP）とその弱いバンド間行列因子はレーザー材料としてあまり有用でない事を証明した事になった。又この事は極めて早い時期にこの材料が発光素子として基本的に弱い事を示したのである。単純にこれは、直接遷移ギャップ結晶が発光素子材料として基本的に秀れている事を示した。

1962年に於ける可視光のGaAs_{1-x}P_xレーザーと最初の現実的発光ダイオード（LED）との実現は、それがどの様に評価されたか

は別として、将来のレーザー及びLED開発の道を示す信号となったのである。

第一に、可視光GaAs_{1-x}P_xレーザーはIII-V化合物半導体は多くの初期の研究者達が間違っただけで考えていた様な本来的に欠陥に満たされた擾乱された系ではない事を証明したのである。又化合物の組成（2）とそのエネルギー・ギャップを変更出来る事を示した事はヘテロ接合を作る為に必要な自由度を与える事になった。こうして早くも1962年にはGaAs_{1-x}P_xの様な直接遷移型化合物はより重要であり、間接遷移型のGaPの様な二元材料はおそらくサブストレートとしての用途以外ではあまり重要ではないという結論を下す事が出来たのである。

では私達は次の基本的な問題を考えてみよう：p-n接合は光を放出する、しかし、それは発光素子にとって如何に基本的なものであるか？それは究極のランプか？この質問に答える為に私達は小さいドープしていない直接遷移ギャップをもつ半導体の板上に光（入射光、 $hw \geq E_g$ ）をあて電子の化学ポテンシャル（ $E_{Fn} \equiv -q\phi_n$ 、電子の擬フェルミ・レベル）を伝導帯の端に、 $E_{Fn} \rightarrow E_c$ 、そしてホールの化学ポテンシャル（ $E_{Fp} \equiv -q\phi_p$ 、ホール擬フェルミ・レベル）を価電子帯の端に $E_{Fp} \rightarrow E_v$ （ $E_c - E_v = E_g$ ）に動かしてみる。私達は電荷の中性が保存されてエネルギー帯が平らになる事（直線）に注目する。理想的な場合には私達は100%の量子効率をもって入射したすべての光子を電子-ホール再結合放射としてとり出す（recover）ことが出来る。この際私達は高い屈折率（ $n \sim 3.5$ ）の半導体から再結合放射をとり出す問題点を無視している。

私達はもう一つの考え方が出来る：サンプリを光励起させ、電子-ホール対を発生

させたのであるから、おそらく過剰の電子とホールを再結合放射でなく電流としてとり出す事が出来るだろう。もしも私達が右側の半導体のn型に、左半分をp型にドーピングして電子とホールの「フェルミ準位の伝導連結」を電子-ホール対に対して作ったならば、(引続き入射光があるとして)この事は可能である。私達はこれをいわば理想的なドナーとアクセプタのイオン注入(中性不純物)の形で光はON状態のままやるとしよう。電子-ホール対を電圧 $V \simeq E_g/q$ に対する電流として引き出す代わりに今作った外部のn及びpの伝導連結に"bucking"電圧、対抗電圧 $V \simeq E_g/q$ をかけてみよう。光が照射されていても電流は流れない。そこで光を消そう。すると光で発生した内部の"太陽電池"電圧を消す事になる。そうすると外部の"bucking"電圧、電池は電源となり、"フェルミ準位伝導連結"を通る電流によって電子-ホール対と供給することになる。これは実際私達の擬-2-準位(E_c, E_v)直接遷移ギャップ量子システムをp-n接合に変えた事になる。

この演習の大切な点は理想的な光励起二準位量子システム、すなわち、単純な光ポンプ型の平坦バンド直接遷移ギャップ半導体光源を他方で全く同一な電流駆動の光源にしてしまう事を示す点にある。私達はごく自然にp-n接合を構築させられる事になったのである。そして勿論、入力電流を加える事によってもう光ポンプの必要性はなくなったのである。p-n接合は、実際、光源の基本的形態であり、本質的には電子-ホール注入電流で(白熱電灯の様な熱によってではなく)直接駆動される二準位量子システムである。勿論、通常のp-n接合は私達が記述して来た様な光源としては単純に過ぎる。

実際にはそれは光吸収をへらす為にn型とp型の入力電流部が("フェルミ・レベル伝導結合")より広いエネルギー・ギャップを持ってそれより狭いエネルギー・ギャップの狭い活性領域をはさむ二重ヘテロ接合の形になっている。又これはこの薄い活性領域($Lz < 1/\alpha$, α は吸収係数、 $\alpha \sim 10^4 \text{cm}^{-1}$)への電子-ホール対の注入をより効率的にし、同時にキャリアを閉じこめ又或程度再結合放射をも閉じこめる役割を果たす様になる(レーザーの様に)。

ここで現代のLED(或いはレーザー)をどの様に実現するかという現実的な問題が残っている。 $\text{GaAs}_{1-x}\text{P}_x$ (原型)は直接遷移ギャップ化合物半導体が重要である事、又ヘテロ接合を作る事が出来る事を示す点でその重要性を明らかにすることに貢献したが、その後継材料である $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 及び $\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{P}$ 更にはこれが改善された $\text{In}_{0.5}(\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x})_{0.5}\text{P}$ はヘテロ接合を作に更に重要であることを証明した。何故ならば、Al-Gaを置きかえた材料は格子常数を変える事なくエネルギー・ギャップを変化させる事が出来るからである。この事は結晶欠陥を減少させ、従って無効電流によるロスを削減する為に重要である。これらの材料系は一般的な下地材料であるGaAsと適合するし、又更に重要な事はアルミニウムが取り扱えるDupuis型の有機金属化学気相堆積法(MOCVD)の反応装置で経済的に大規模に形成出来る事である。

ここから先は簡単の為に、ただ比較的厚いGaAs下地の上にエピタキシー成長した(MOCVD)赤-オレンジ-黄-緑(ROYG)の $\text{In}_{0.5}(\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x})_{0.5}\text{P}$ のヘテロ層だけを考えてみる事にする。しかし、GaAs下地はそのエネルギー・ギャップが小さい為に不幸にもROYGの再結合放射に対して強い光吸収体と

して働いてしまう。半導体は、ただ再結合放射を引き起こすだけではない：その外界との間の高い屈折率 ($n \sim 3.5$) (伝達の不整合) の為に、それがあたかも“箱”、容器の様に働いてしまう、それはフォトンをとらえ、その“箱”の中の吸収体すなわち厚いGaAs下地によってそれを消滅させてしまう。私達が真に効率的なLEDを実現しようとするならば、薄い $\text{In}_{0.5}(\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x})_{0.5}\text{P}$ のヘテロ層が成長しているその下地の厚いGaAsを取り除かなければならない。最近KishとCraford及びその協力者達 (ヒューレット・パカード、1994) はGaAs下地は取り除く事が出来、種々のウェハ-はりつけの“トリック”によってLEDの組立が可能な十分な厚さの光吸収の起こらないGaPのウェハ-に置きかえる事が出来ることを示した。光を吸収しないGaPの土台を使う事によって光出力は200%に増加させる事が出来、今やROY LEDは白熱電灯の明るさをワット当たりルーメンの値で凌駕する事になった。この開発と平行して、同じIII-V気相エピタキシャル結晶成長技術 (MOCVD) で青色の光を発する直接遷移ギャップIII-V材料の $\text{In}(\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x})\text{N}$ ヘテロ接合LEDの構築が可能になった (中村他、日亜、1994)、まだ現在性能は高くないが、それでも今後かなり大きな改善の可能性を残している。この様にして、III-V材料は全可視光範囲に対応出来る (おそらくII-VI材料からの援助を受けつつも)。

これらは注目すべき開発である：30年経って直接遷移ギャップIII-V材料はLED材料として広く世の中に広がった、更に加えて、LEDは白熱電灯よりもすぐれた性能をもっている為にランプとなったのである。照明産業はそれが認識されていると否とに拘らず、

長期的な脅威にさらされているのである。LEDがすべての可能なディスプレイの用途に向けて開発が進み、又全可視光範囲で同等な性能を発揮するまでにはもう少し時間を必要とするだろう。おそらく、完全に仕上がったランプになるまでにはそれ以上の時間が必要とされるだろう。それにも拘らず、事実すでにそれが起り始めている様に、そういう事になるだろう。LEDにとって直接遷移ギャップ材料の持つ特別の重要性が決定的に確立される迄に如何に長い時間が経過したのか、そして一般的にいつて科学的な進歩を重要な技術的進歩に変換するのにどれだけ長い時間が必要とされるのかを考えるのは興味深い事である。又関連した意味に於て、半導体が電子 (-) とホール (+) 伝導の能力を持っており、同時にフォトンが発生し、検出し又処理する能力を持っている為に、半導体はエレクトロニクスの益々広く一般的な材料になって来ており、今や照明と光の世界に侵入し始めているのである。再び最初に掲げた質問に答えよう：p-n接合は究極的なランプである。

最後になるが、Bardeenのキャリア注入の解明 (identification) が、今も続いて居り、今後も長く長く続く様に定められているエレクトロニクス革命の開始を印したものであることは今や明白である。実際、John Bardeenを現代エレクトロニクスのゴッド・ファーザーと考え、エレクトロニクスが存在する限り彼に最大の敬意を払うのは妥当な事である。事実、エレクトロニクス又それが行っているその物の代わりは存在しない。そして私達は常にJohn Bardeenの負債によって誇舞され、又それを負わされているのである。