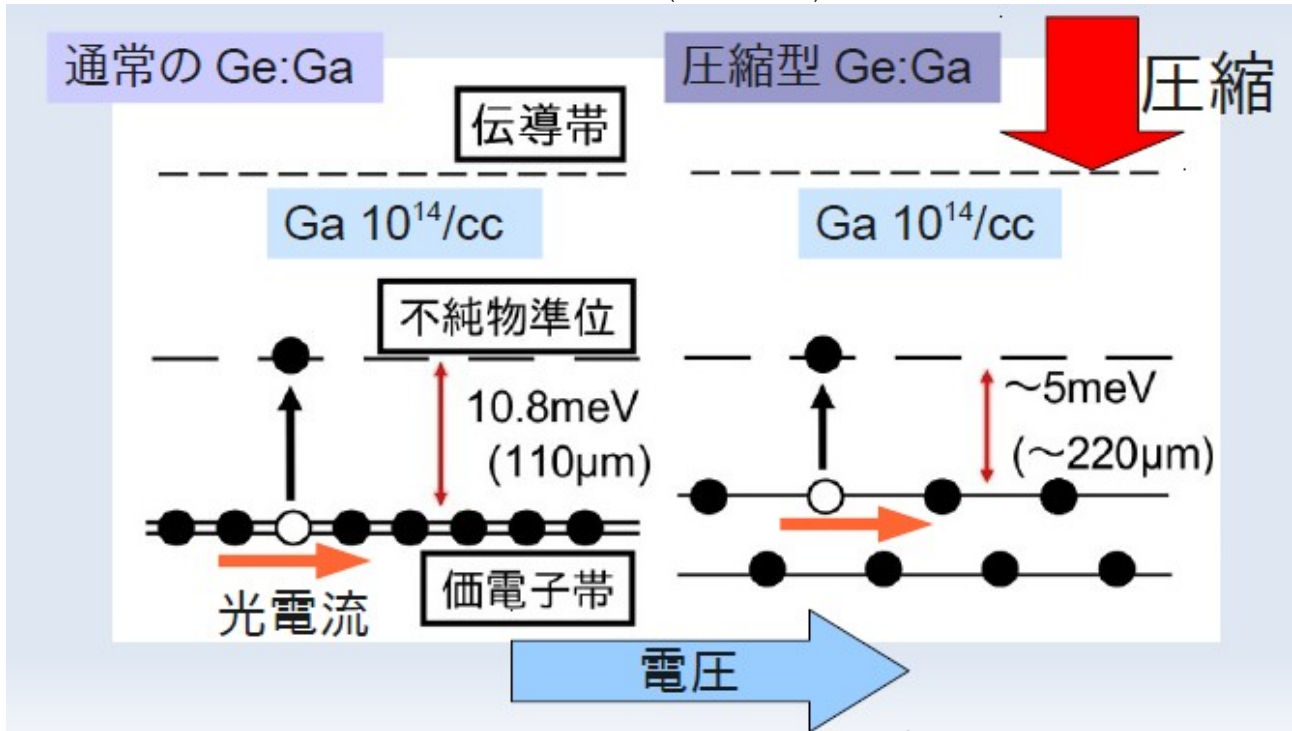


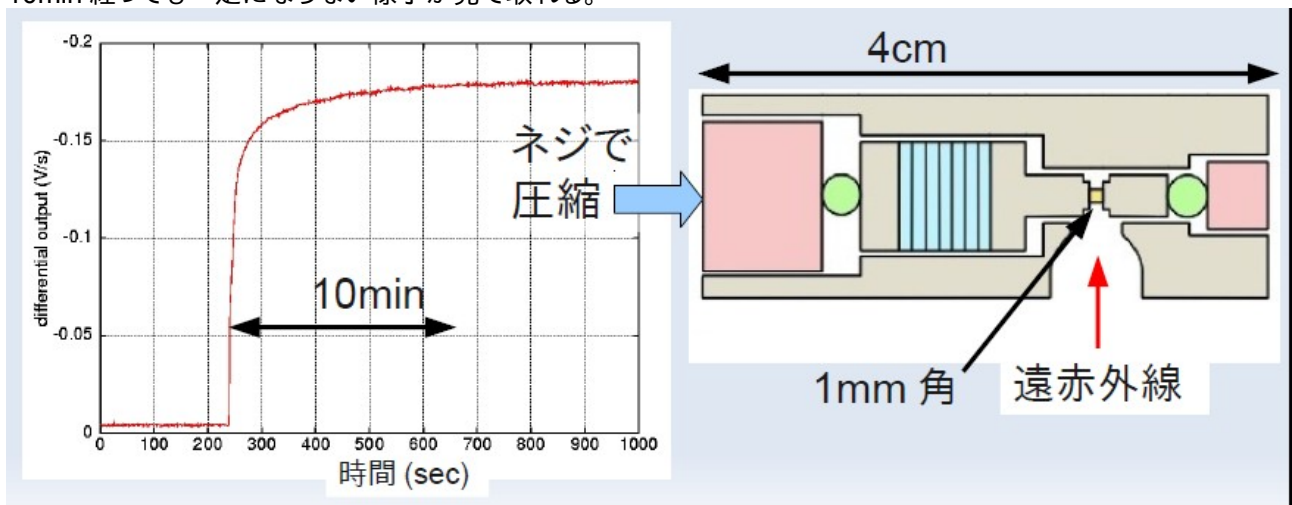
遠赤外線観測のために、現在、主流で使われているのは Ge に Ga を $10^{14}/\text{cc}$ 添加した P 型不純物半導体である。添加した Ga によって価電子帯と伝導帯の間に不純物準位が形成される。この価電子帯と不純物準位間のエネルギー差に相当するエネルギーの光子が当たると価電子帯からホールを励起して、電圧をかけておくことによって光電流を読み出す。こうして、通常の Ge:Ga は長波長側は $110\mu\text{m}$ まで感じる。サイエンスの要求からはさらに長い波長まで感度を持たせたい。その場合、素子を機械的に圧縮する。すると、価電子帯の準位が分裂して、 $200\mu\text{m}$ まで感じるようになる(下図を参照)。



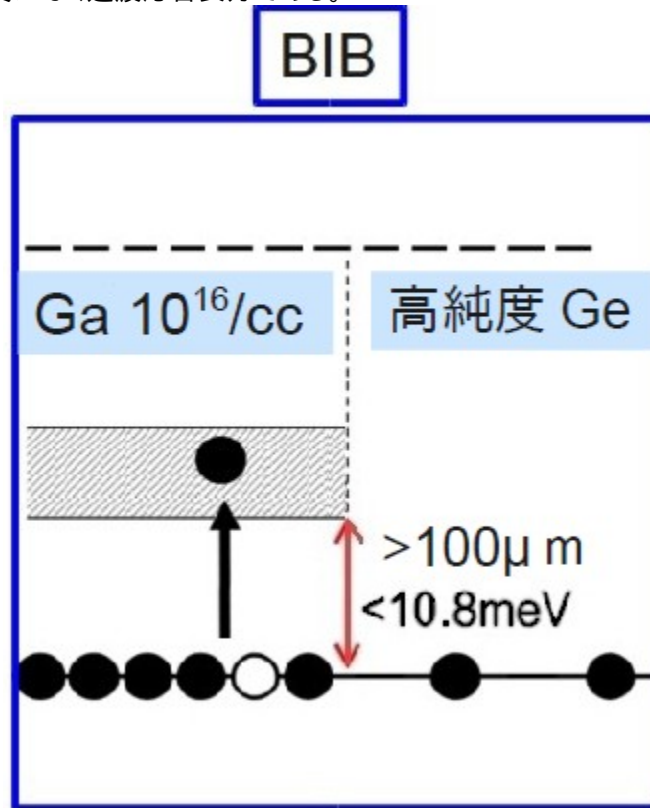
しかし、この方法には、問題点がある。

圧縮するためには大きな加圧機構が必要である。実験に用いている装置では 1mm の素子に対して 4cm の機構を用いている。下図で左からネジを締めて加圧する仕組みになっている。したがって、多素子化した際、圧をそろえるのが困難である(下図、右の図を参照)。

また、過渡応答特性が悪いという問題も持つ。下図の左は、ステップ型の光を見せたときの検出器出力である。10min 経っても一定にならない様子が見て取れる。



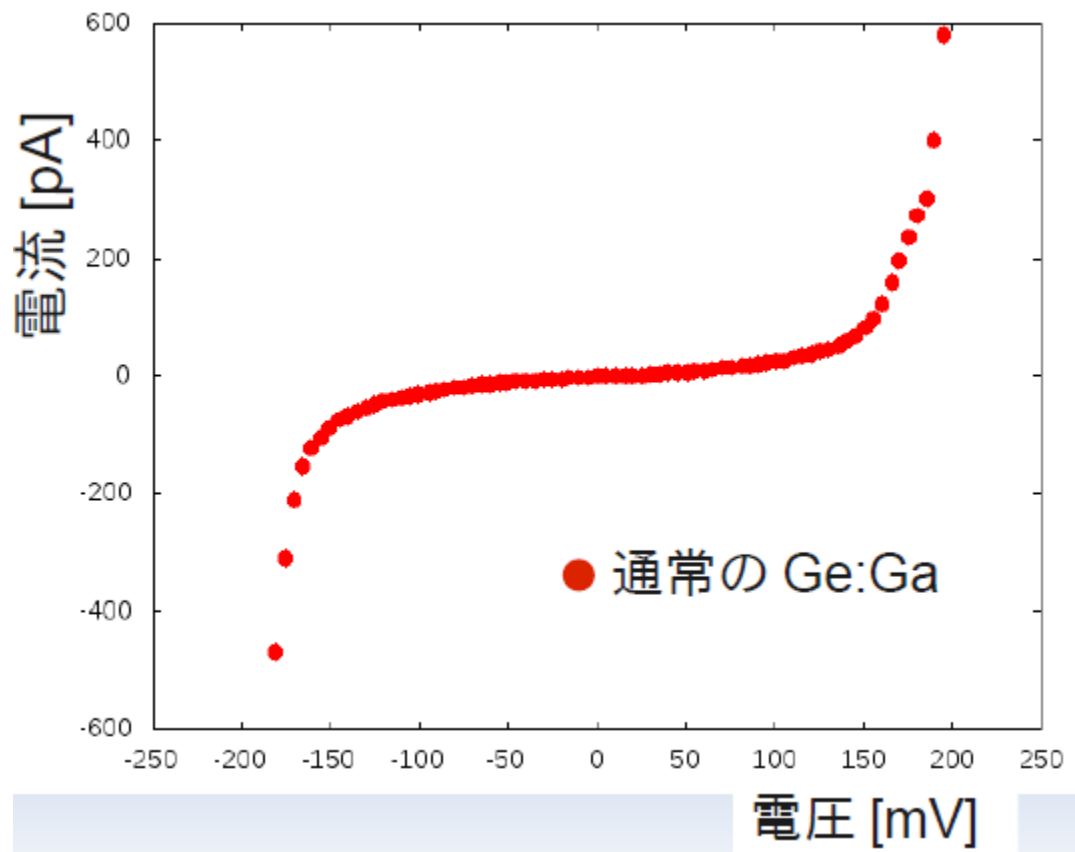
これらの問題を解決するために提唱されているのが BIB 型 Ge:Ga 検出器である。構造としては Ga 濃度 $10^{16}/\text{cc}$ の高濃度の層に高純度の Ge の層を張り合わせた形をしている。高純度 Ge の層は、高濃度層由来の暗電流を防ぐために設けられている。一方、高濃度 Ga 層を設けることにより、吸収体の数が多くなり、光電流が多くなる。さらに、不純物準位が幅を持ち、価電子帯との間が狭まり、より長波長まで圧縮なしで感じるようになる。また、電荷注入の必要がなく過渡応答良好である。



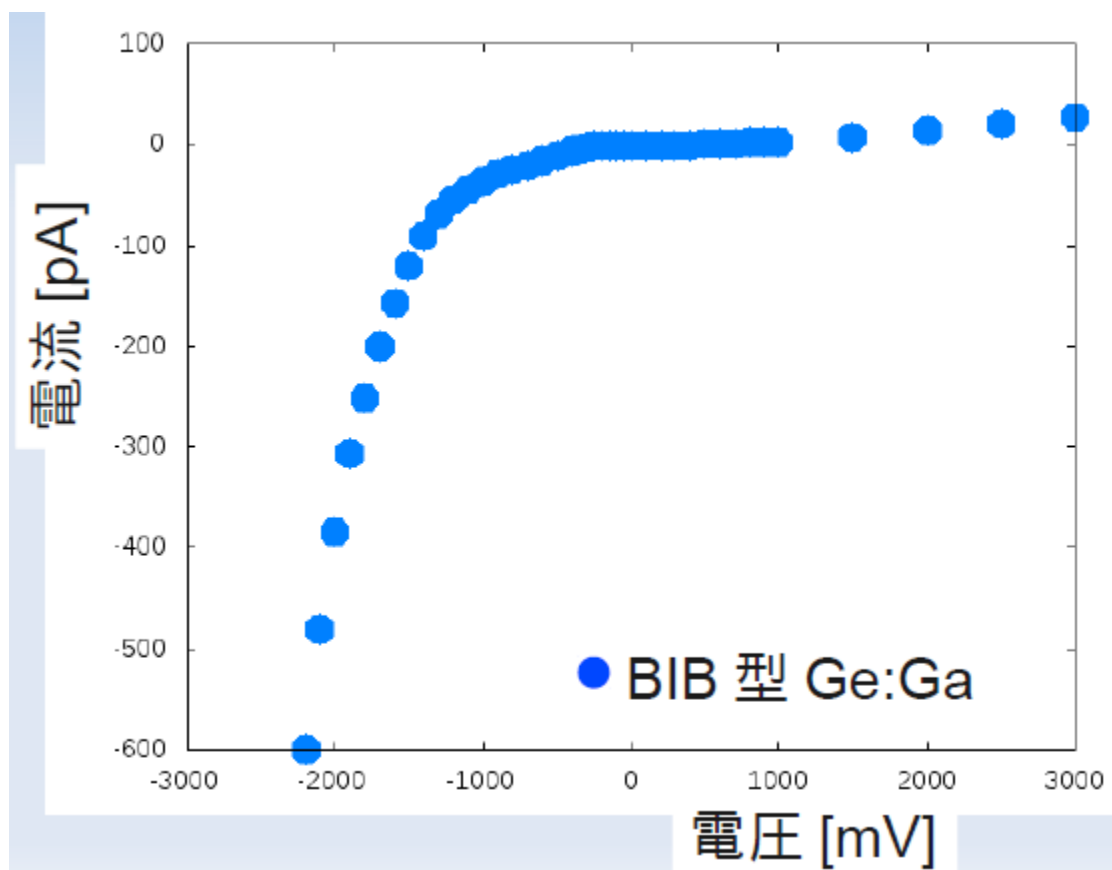
上記のように、BIB 型接合素子は 2 枚の半導体を貼り付ける構造だが、境界で不純物の濃度勾配が急峻な方が光感度良好であるという性質を持つ。過去の試作品では、イオン打ち込みなどの方法が取られていたが、これらはいずれも高温条件下の接合だった。高温条件下のため、不純物が拡散してしまい、濃度勾配が緩やかになる。そこで、三菱重工業による、表面活性化常温ウェハ接合を試験した。常温接合なので、熱拡散が起こらず、濃度勾配が急峻になるはずである。具体的な接合方法としては、表面の酸化物などを Ar などで吹き飛ばし、結合手をむき出しにさせる。同じ処理を施したものをもう一枚用意し、それらを接合する。この方法の BIB 型素子への適用可能性を評価するために実験を行ってきた。

実験は装置全体を 2K 以下に冷却して行った。測定した項目は、電流電圧特性、熱電流、光感度である。

まず、電流電圧曲線とは、ある電圧をかけたとき、どのぐらい電流が流れるかという関係である。下図の赤いプロットは現在主流の通常の Ga:Ga 素子の電流電圧特性のプロットである。左右対称な形をしている。横軸は電圧 mV、縦軸は電流 pA である。この曲線は、電圧ゼロ付近のオームの法則にしたがう領域と、電圧の絶対値が 200mV あたりの雪崩増幅などの起きているブレイクダウン領域に分けられる。赤外線検出器として使用する際には、オーム領域を用いている。

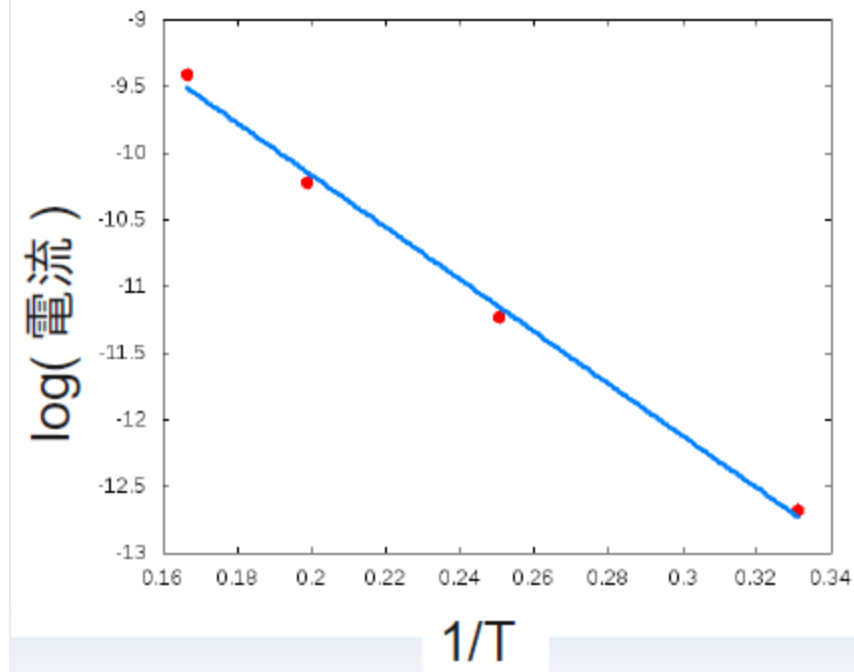


一方、BIB 型の Ge:Ga の場合は、下図のような、左右非対称な形をしている。軸は先と同じで、横軸は電圧 mV、縦軸は電流 pA。先と同じようにブレイクダウン領域が存在する。そのほか、電圧が正の領域では、ほとんど電流が流れない領域、そして、少しずつ電流が流れる領域から成っている。今回、実験で使っているのは電圧 2.5V あたりの領域である。

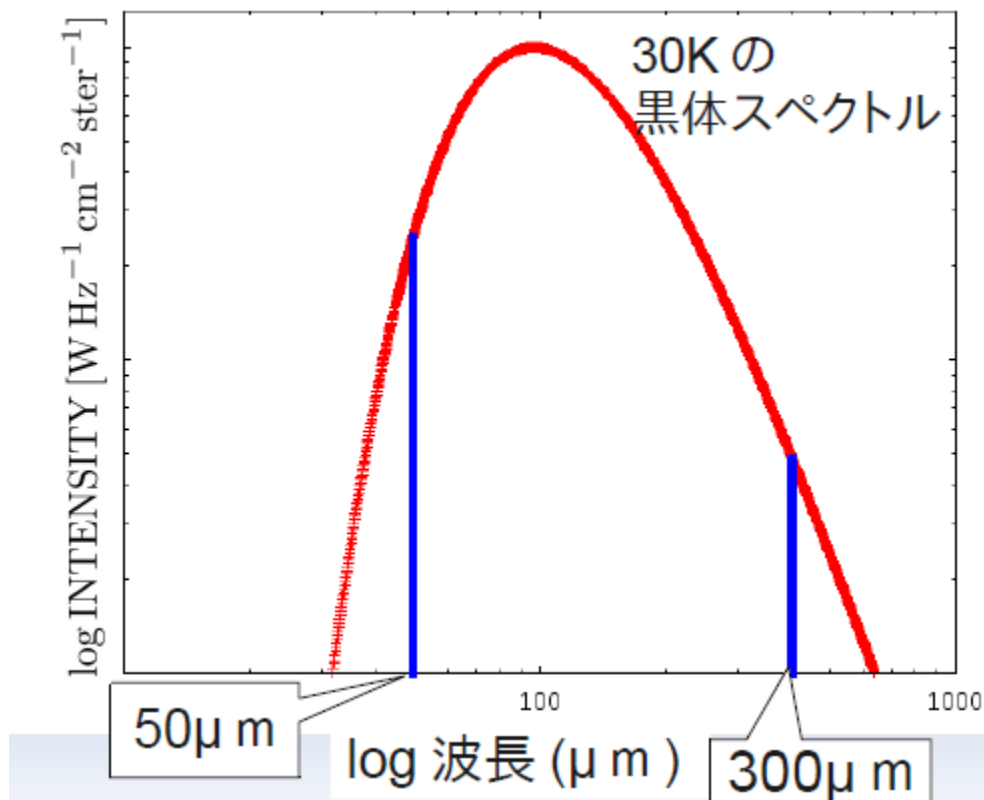


次に、熱電流について説明する。熱電流とは、光でなく熱によって励起されて生じる電流である。エネルギー準位の差を越えるホールの数は、ほぼボルツマン分布にしたがっており、熱電流の対数を取ると E/kT に比例する。 E は準位間のエネルギー、 k はボルツマン定数、 T は素子の温度である。いろいろな温度で、電流を測定することで E を求める。

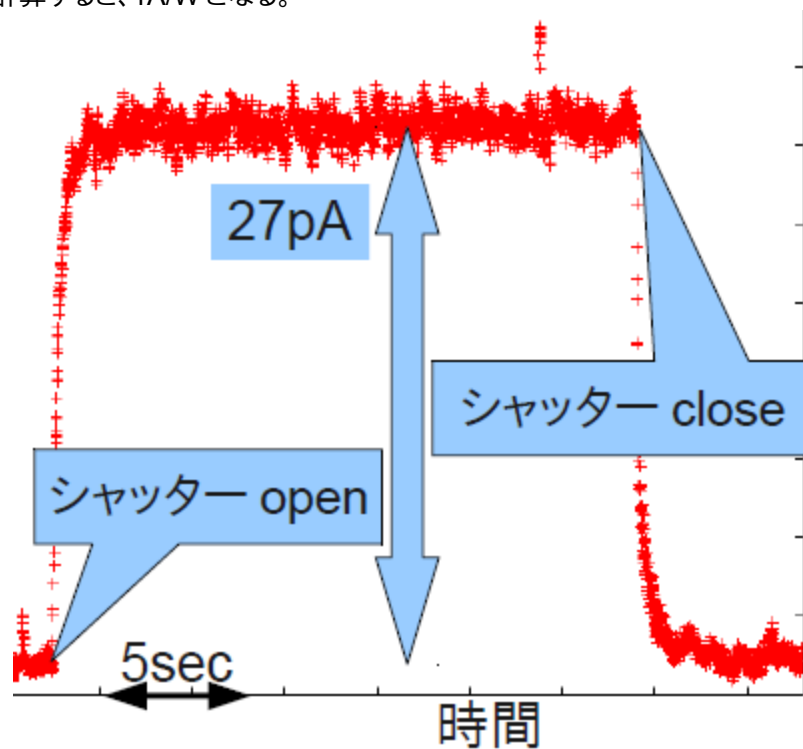
測定の結果をプロットしたのが下図の赤い点。横軸 $1/T$ 、縦軸 \log 熱電流。fitting すると、青い直線になって、この傾きから計算した E つまり、準位間のエネルギー差は 4.0meV となって、 $300\mu\text{m}$ まで感じていることがわかった。これは通常の Ge:Ga よりも長い波長にまで感じることを示している。



最後に、光感度について説明する。光感度とは、赤外線検出素子に対する入射フラックスに対して、何アンペアの電流を取り出せるのかという量である。下図の赤いラインは 30K の黒体のスペクトルで、横軸は波長の対数、縦軸は intensity の対数である。入射フラックスの計算方法を説明する。まず、黒体スペクトルのうち、夕感波長範囲、すなはち、青い線で囲まれた領域を積分する。左の線は $50\mu\text{m}$ 、右は $300\mu\text{m}$ にしてある。この値に、検出器が光を受ける面積、検出器から黒体光源の開口を見込む立体角をかけた値として入射フラックスが求まる。取り出される電流量は実験で測定する。



下図はシャッターを用いて、光を見せたり遮ったりしたときの検出器の出力の変化を示している。横軸は時間で縦軸は光電流。これから2.7pA 流れていることがわかる。以上から光感度を計算すると、1A/Wとなる。



以上をまとめると、

次世代の遠赤外線検出素子としてBIB型Ge:Ga素子をJAXA/宇宙科学研究所と共同で開発している。このタイプの素子は、2枚の半導体を張り合わせた構造をしているが、その接合方法として、三菱重工業による、「表面活性化常温ウェハ接合」の適用可能性を評価した。その結果、左右非対称な電流電圧特性を得た。また、波長感度が長波長側に伸びており、光にも反応していることを確認した。

これらの実験結果はいずれもBIB型素子の特徴を示しており、表面活性化常温ウェハ接合がBIB型素子に対して適用可能であることを示している。