

低損失・高速度ダイオード

Low Loss and High Speed Power Diodes

コンピュータの端末電源整流用として低損失・高速度電力用ダイオードの需要が高まってきている。この種の素子としては、金属-半導体接合を用いたショットキーダイオードが知られているが、本稿ではpn接合を用いた30Aクラスの低損失・高速度ダイオードの構造、及び電気的特性について述べる。

本ダイオードは浅いpn接合を用いることにより、従来のpn接合高速ダイオードに比べ順方向電位降下が0.85Vと約50%の低損失化を図った。またショットキーダイオードに対して(1)逆阻止電圧が100V(ショットキー30V)と高く、しかも逆漏れ電流が1mA at 150°C(ショットキー200mA at 125°C)と小さい。(2)最大動作接合温度が150°C(ショットキー125°C)と高いため、冷却用フィンの大きさが $\frac{1}{2}$ で済む、という利点を持っている。

松崎 均* *Matsuzaki Hitoshi*
 荻谷忠昭** *Kariya Tadaaki*
 山本敏孝* *Yamamoto Toshitaka*
 池田裕彦* *Ikeda Yasuhiko*
 宮田健治*** *Miyata Kenji*

1 緒 言

電力損失の低減は、常に電力用半導体素子の重要課題であるが、特に最近では電子計算機端末機器などの直流安定化電源用ダイオードとして、逆回復時間が数百ナノ秒程度と高速で、しかも順方向電位降下(Forward Voltage Drop以下、 V_F と略す)の小さなダイオードの要求が高まってきている。従来のpn接合による高速ダイオードでは、ベース層にライフタイムキラ*1)を拡散させるため必然的に V_F は大きくなり、低損失化と高速化とを両立させることは困難であった。この両者を両立させるものとして、最近ではショットキーダイオードが市販されているが、 V_F が従来のpn接合高速ダイオードの約 $\frac{1}{2}$ と小さい反面、逆漏れ電流が大きいため逆阻止電圧、最大動作接合温度が低いなど、従来のpn接合ダイオードに比べ一長一短がある。

我々は信頼性に実績のあるpn接合により、低損失化と高速化とを同時に達成することのできる素子について検討した結果、p層の不純物量を極端に小さくすることによって低損失化と高速化を図る新しい素子構造を開発し、その生産プロセスを確立した。

本稿では、この新しい低損失、高速ダイオード(Low Loss Diode以下、LLDと略す)の構造、動作原理及び電気的特性について述べる。

2 LLDの構造

2.1 特 長

図1にLLDの構造をpn接合高速ダイオード、及びショットキーダイオードと比較して示した。従来のpn接合ダイオードでは高速化を図るためにnベース層にAuなどのライフタイムキラを拡散する。このため、nベース層内の抵抗率が大きくなりダイオードの発生損失は増加する。一方、ショットキーダイオードは金属とnベース層を直接接触させた構造になっており、p⁺層が存在しないため順方向通電時にnベース層にはホールが注入*2)されず、逆回復時間が短く高速動作が可能である。しかも接合電位が低いため、 V_F が小さく発生損失も少ない。これに対し本稿で述べるLLDは、pn接合とショット

キー接合のいわば中間領域の接合を持っている。すなわち、後述するようにp層の厚さを極めて薄くしてp層の不純物量を少なくするという、いわゆる「浅い接合」により、低損失化、高速化を同時に達成し、かつpn接合ダイオードと同等の逆特性、信頼性を維持していることがLLDの特徴である。その構造は図1(b)のようにn/n⁺シリコンウェーハの上に、適度のボロンを不純物として含んでいる多結晶p⁺層をエピタキシャル法で形成させるものである。この種の浅い接合は、一般に電極層などの外部歪の影響を受け、電気的諸特性に悪影響を及ぼすことが少なくないが、LLDの場合は浅い接合が多結晶p⁺層によって保護されているため、通常のpn接合ダイオードと同等の逆特性を示す。

2.2 浅い接合の動作原理

pnn⁺構造のダイオードで、pエミッタ層の厚さ d_E が電子の拡散長に比べ非常に小さい場合、ダイオードの V_F は、

$$V_F \equiv V_{J1} + V_B + V_{J2} \\ = \frac{2kT}{q} \ln \frac{1}{n_i} \left\{ \sqrt{\frac{Qj}{D_n q}} + \frac{j d_B}{2q D_n} \right\} \dots\dots\dots (1)$$

ここに V_{J1} : p-n接合での電位降下

V_{J2} : n-n⁺接合での電位降下

V_B : nベース層内での電位降下

Q : pエミッタ層の不純物総量 ($= p_E \times d_E$)

※1) ライフタイムキラ: キャリヤのライフタイムを短縮させる不純物。これをシリコン中に拡散することにより素子の逆回復時間は短くできるが、シリコン内での抵抗率が上昇して損失が増大する。

※2) ホールの注入: 半導体素子は単結晶層に少数キャリア(nベース層の場合はホール)が注入されて順方向通電が行なわれるが、印加電圧を逆転したとき、この注入された少数キャリアが、逆回復を遅らせる要因となる。ライフタイムキラはこの少数キャリアのライフタイムを短縮させて逆回復を早くさせるものである。

* 日立製作所日立工場 ** 日立製作所日立工場 理学博士 *** 日立製作所日立研究所

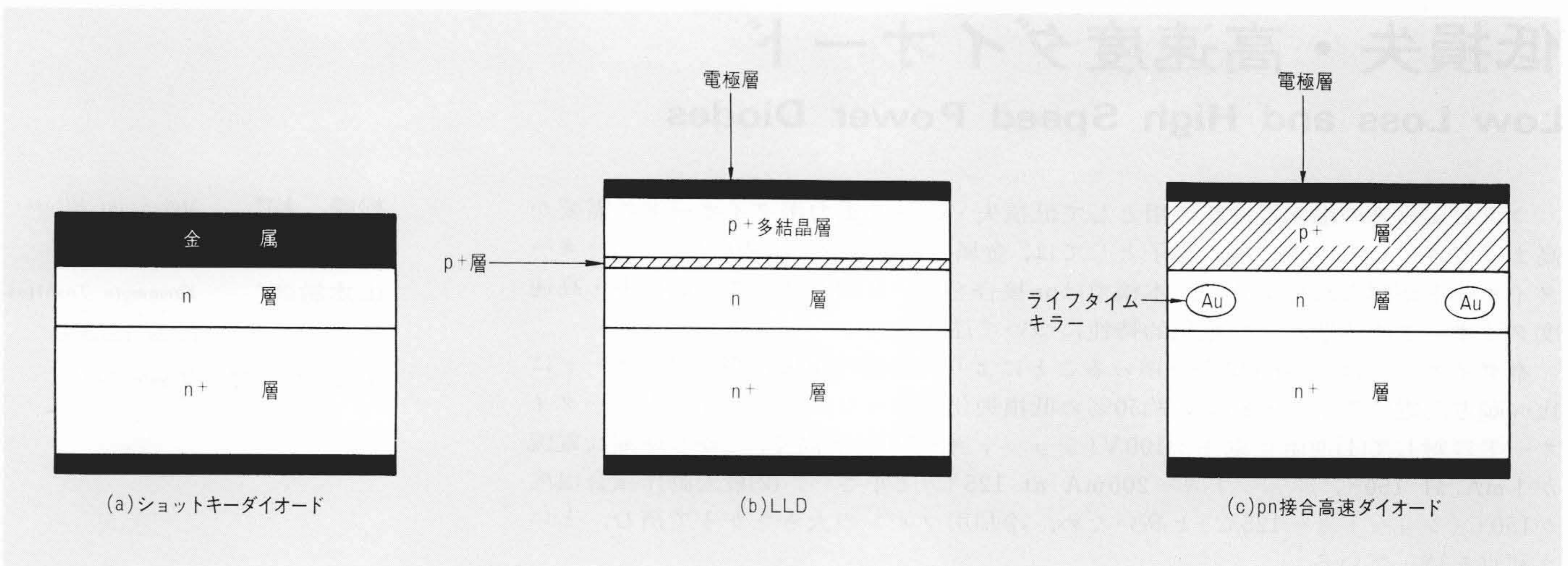


図1 各種高速ダイオードの構造比較 LLDは極めて薄い p^+ 層を持ち、従来のpn接合とショットキー接合の中間領域の接合を形成している。

p_E : p エミッタ層の不純物濃度
 d_E : p エミッタ層の幅
 d_B : n ベース層の幅
 D_n : p エミッタ層での電子の拡散係数
 D_n : n ベース層での電子の拡散係数
 k : ボルツマン定数
 q : 電荷素量
 n_i : 真性半導体におけるキャリア濃度
 T : 絶対温度
 j : 電流密度

で与えられる。¹⁾これを示したのが図2である。このようにpエミッタ層の不純物総量 Q を小さくすれば V_F は低くなり、この効果はnベース層の幅 d_B が薄いほど大きい。 Q を小さくするためにはpエミッタ層の幅 d_E と不純物濃度 p_E を共に小さくするのが効果的($Q=p_E \times d_E$)で、低不純物濃度の、しかも厚さの極めて薄いp層を持つ浅い接合によって V_F の低減が可能となり低損失化を達成できる。

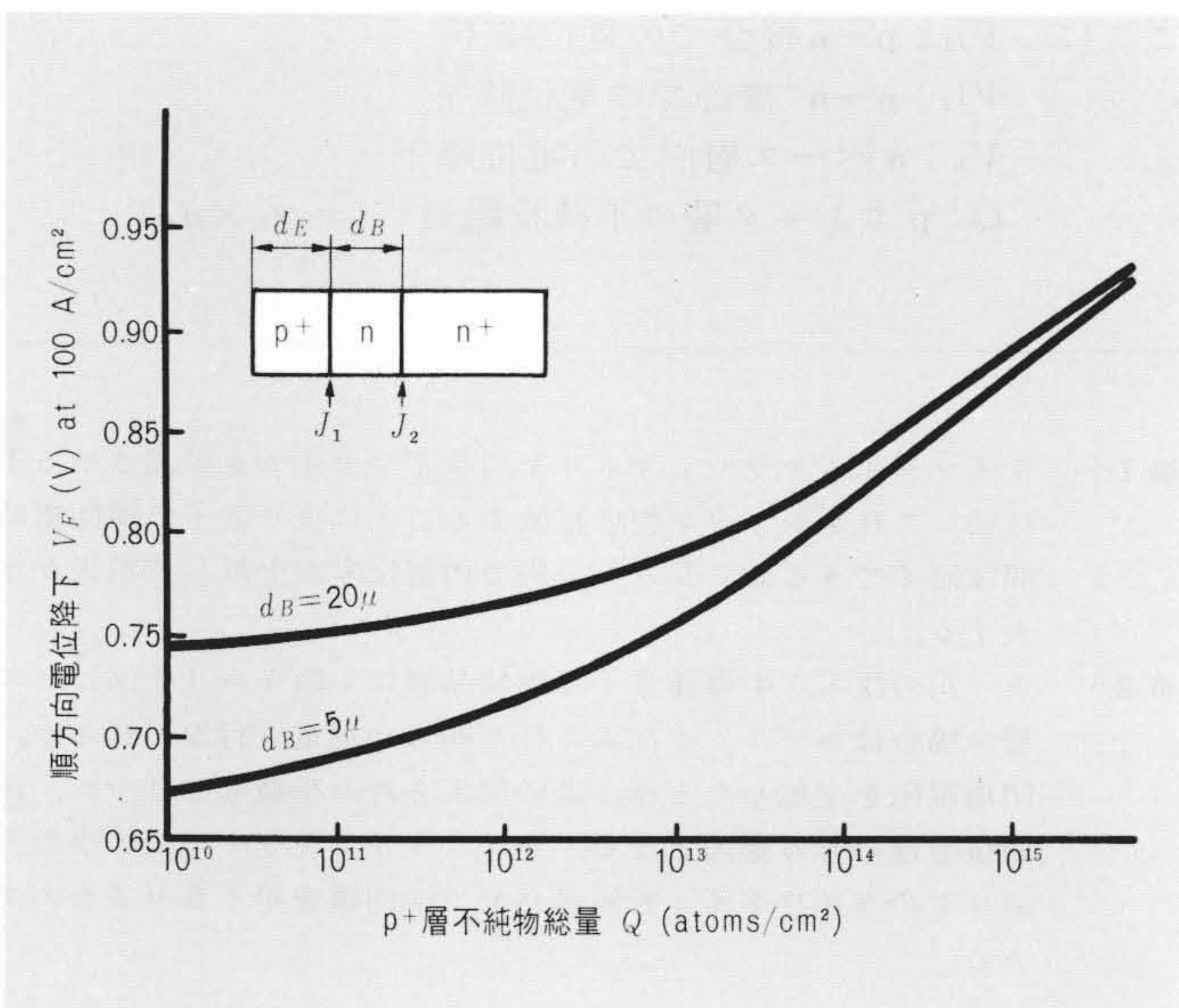


図2 p^+ 層不純物総量 Q と V_F の関係 LLDは p^+ 層不純物総量 Q を低減して低損失化を図っている。

一方、p層の厚さ d_E を非常に薄くすると、pエミッタ層内での電子の濃度の勾配が急峻となり、 J_1 接合(図2)での電流のキャリアは電子が大部分を占めることになる。このため、pエミッタ層からnベース層へのホールの注入量は減少し逆回復時間は短くなる。しかも逆回復特性は、ソフトリカバリー^{※3)}を示し、高周波動作が可能である。

3 LLDの電気的特性

3.1 LLDの定格仕様

表1にLLDの電気的定格仕様を示す。定格順電流30A、耐圧100V、逆漏れ電流100 μ A、順サージ電流600A、最大動作接合温度は150 $^{\circ}$ Cであり、これらは従来のpn接合ダイオードと同等である。これに対し順方向電位降下 V_F は、0.85Vと従来のpn接合高速ダイオードに比べて30%低くなっている。

3.2 電気的特性

図3はLLDの順特性をpn接合高速ダイオード、及びショットキーダイオードと比較して示したものである。接合温度 $T_j=20^{\circ}$ Cではショットキーダイオードとpn接合高速ダイオードの中間に位置しているが、最大動作接合温度($T_{jMAX.}$)では、ほぼショットキーダイオードに匹敵する。図4は定格逆阻止電圧における漏れ電流の温度依存性であるが、LLDのほうがショットキーダイオードに比べ漏れ電流は3桁以上小さい。

このようにLLDの電気的特性は、高温動作領域で特に優れている。

3.3 発生損失

ダイオードに交流電圧を印加した場合、発生する電力損失 P は(図5)、

$$P = P_F + P_{rr} + P_r \dots \dots \dots (2)$$

ここに P_F : 順方向損失

P_{rr} : 逆スイッチング損失

※3) ソフトリカバリー：従来のpn接合高速ダイオードは順方向通電時にnベース層に注入されるホールの量が多いため、逆回復時の電流変化が急峻で(ハードリカバリー)ノイズ発生の原因になっていた。これに対しLLDは、nベース層に注入されるホールの量を減らして高速化を図っているため、逆回復時に急峻な電流変化はみられずソフトに回復する。

表 1 LLDの定格仕様(型式P53/54) 従来のpn接合高速ダイオードに比べ順電圧降下 V_F を30%低減した。

項 目	記 号	単 位	性 能	条 件
せん頭非繰返し逆阻止電圧	V_{RSM}	V	125	
せん頭繰返し逆阻止電圧	V_{RRM}	V	100	
平 均 順 電 流	I_0	A	30	
非 繰 返 し 順 サージ電流	I_{FSM}	A	600	10ms半波, $T_j=150^{\circ}\text{C}$
動 作 接 合 温 度	T_j	$^{\circ}\text{C}$	-40~150	
順 電 圧 降 下	V_F	V	0.85 MAX.	$I_F=30\text{A}$, $T_j=25^{\circ}\text{C}$
	V_F	V	0.65 MAX.	$I_F=30\text{A}$, $T_j=150^{\circ}\text{C}$
逆 漏 れ 電 流	I_R	μA	100 MAX.	$V_R=125\text{V}$, $T_j=25^{\circ}\text{C}$
逆 回 復 時 間	t_{rr}	μs	0.2 MAX.	$I_{FM}=95\text{A}$, $di/dt=-25\text{A}/\mu\text{s}$, $T_j=25^{\circ}\text{C}$

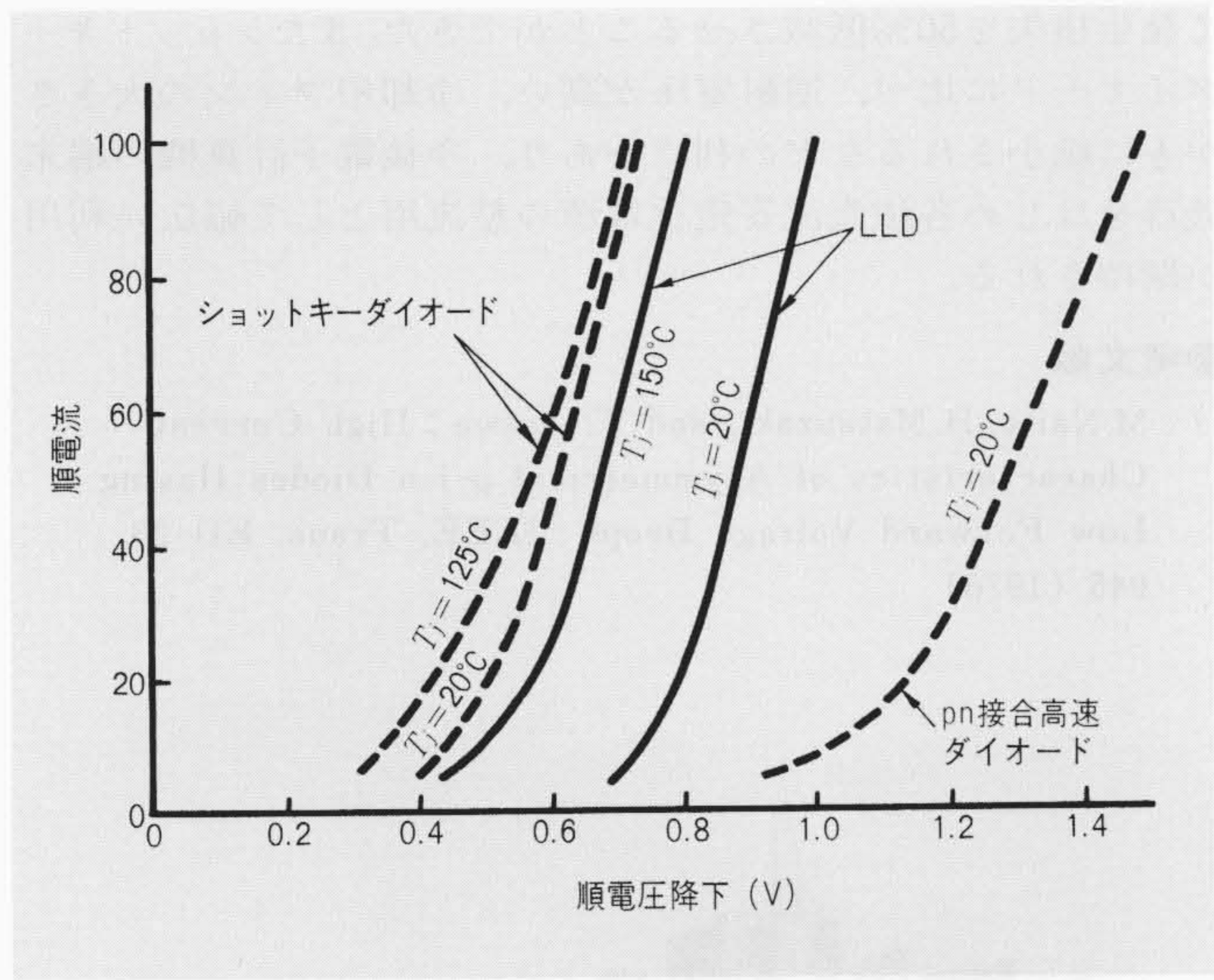


図 3 LLDの順特性 従来のpn接合高速ダイオードに比べ順特性を大幅に改善した。最大動作接合温度で比較すると、ショットキーダイオードとほぼ同等である。

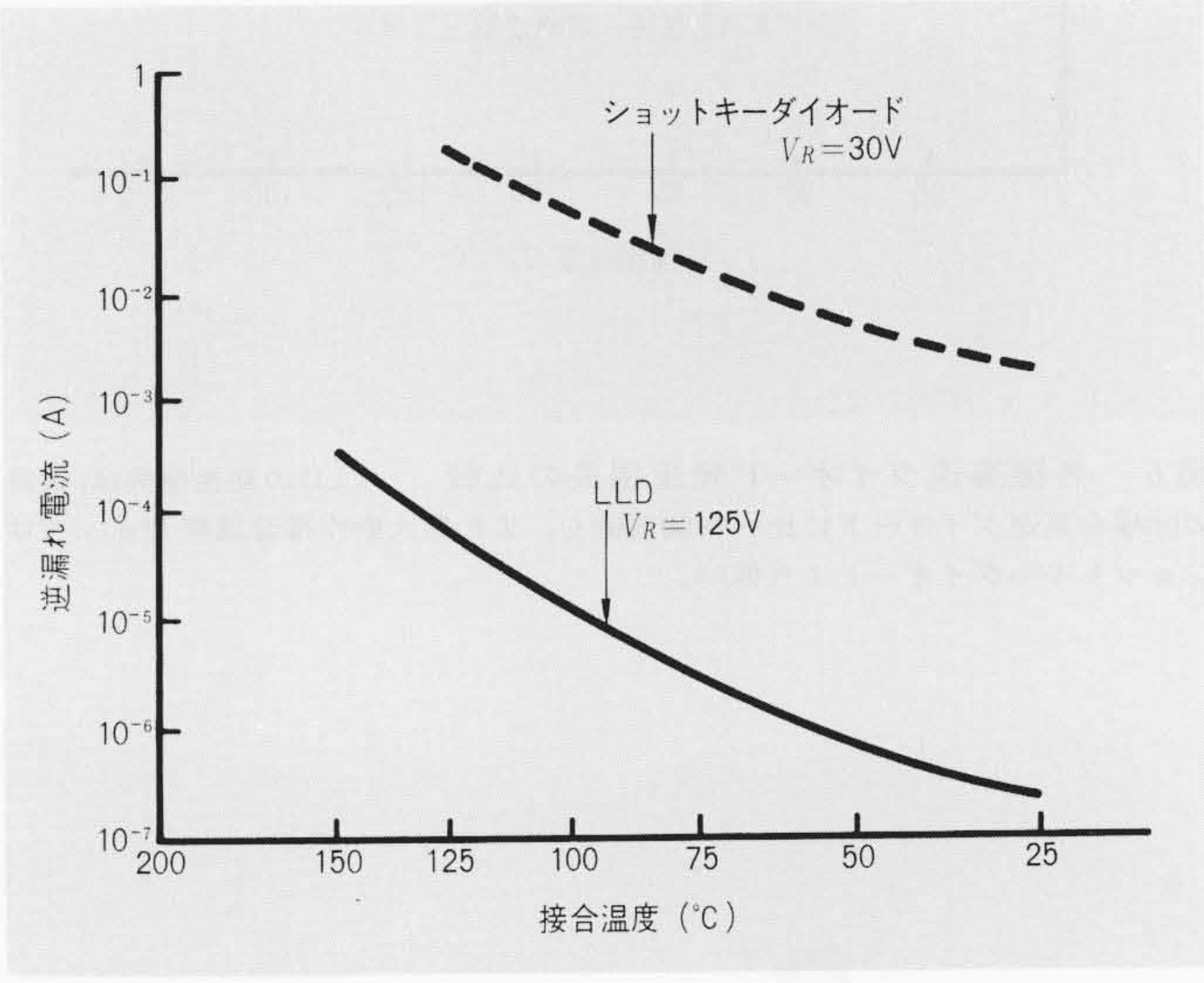


図 4 LLD逆漏れ電流の温度特性 LLDはpn接合であるから、ショットキーダイオードに比べ逆漏れ電流が小さく、高温領域まで動作可能である。

P_r ：逆方向損失

で表わされる。逆回復時間が $0.2\mu\text{s}$ 以下の高速ダイオードの場合、数十キロヘルツ程度の高周波動作では逆スイッチング損失 P_{rr} は無視できるほど小さい。順方向損失 P_F と逆方向損失 P_r を図3の順特性、及び図4逆電流特性から求め、その結果得られたLLDの平均電力損失、及びその温度依存性を図6に示す。高温では V_F が低下するため順方向損失 P_F は減少する。また高温での逆電流が小さいため、逆方向損失 P_r は常温、高温共に順方向損失 P_F より十分小さく、全損失 P は温度とともに減少する。この全損失 P の値は従来のpn接合高速ダイオードに比べ約50%低い。

一方、ショットキーダイオードは図6の破線で示したように、高温で逆漏れ電流が大きくなるので逆方向損失 P_r が無視できなくなり、全損失 P は高温で増加する。このため最大動作接合温度($T_{j\text{MAX}}$)ではLLDの全損失はショットキーダイオードのそれより低くなる。半導体素子を使用する際には $T_{j\text{MAX}}$ での諸特性が放熱設計上の目安となることを考慮すれば、図6からLLDにおける低損失性の特徴は明らかである。

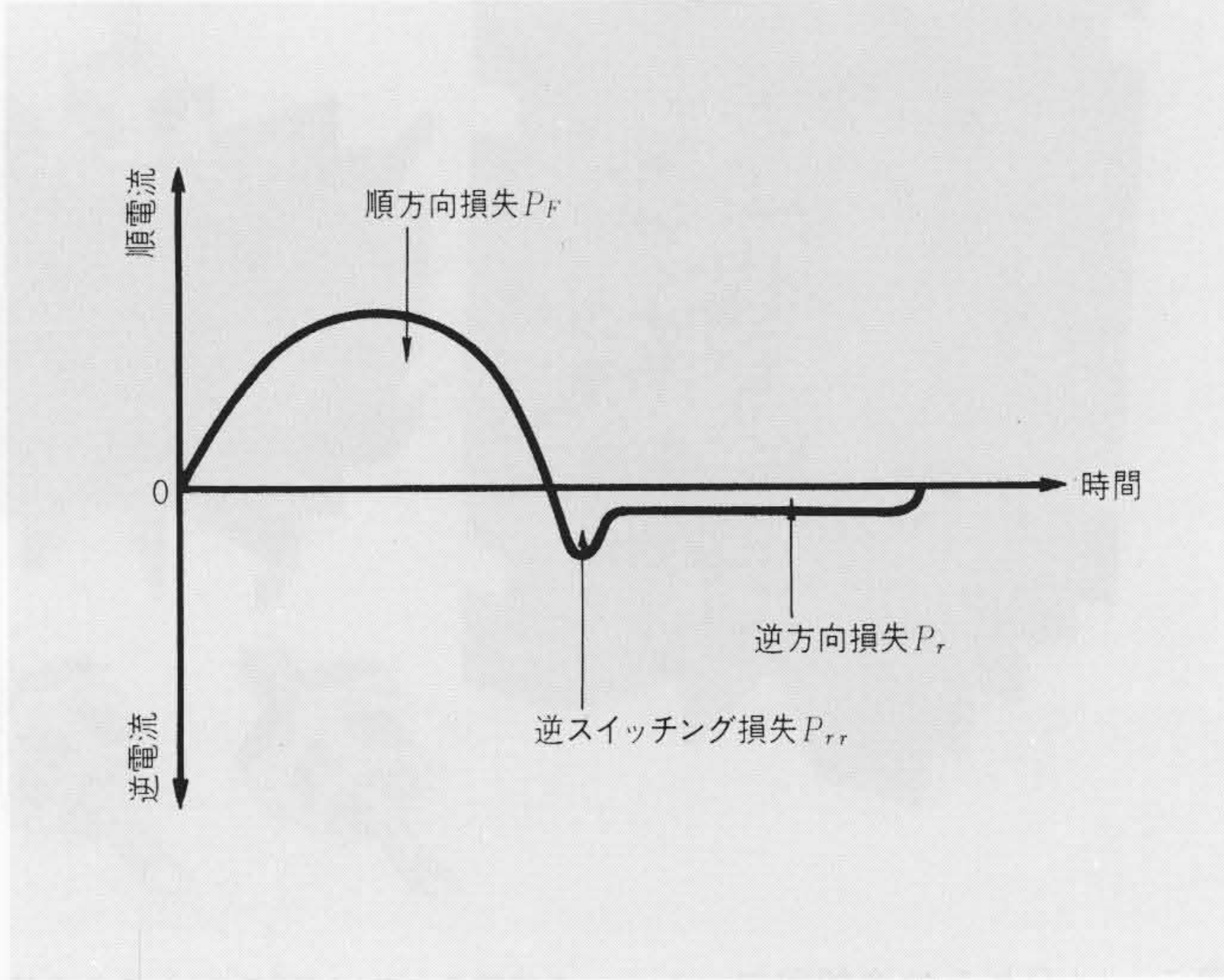


図 5 ダイオードの発生損失 ダイオードの発生損失は P_F 、 P_r 、 P_{rr} の和となる。

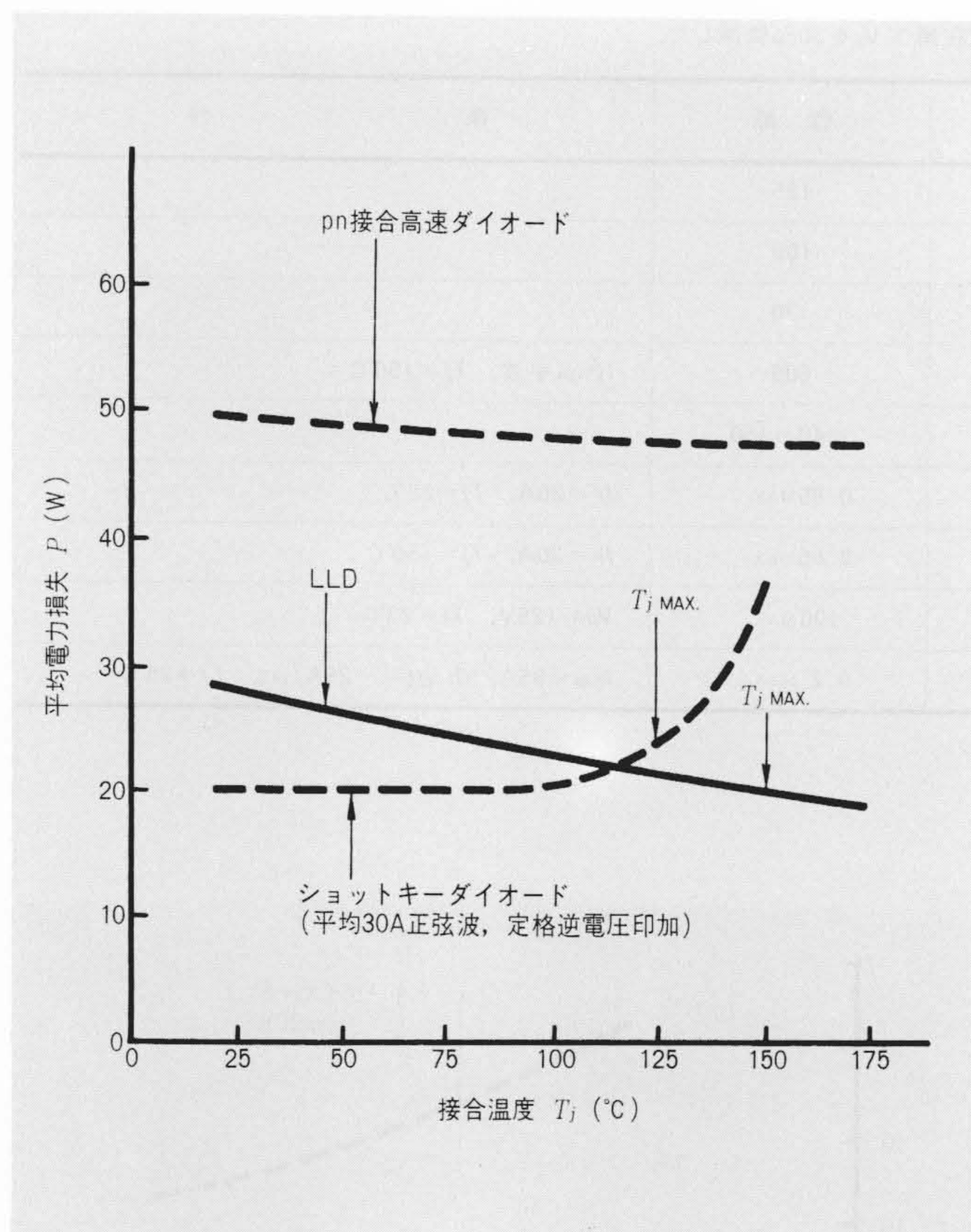


図6 各種高速ダイオード発生損失の比較 LLDの発生損失は、従来のpn接合高速ダイオードに比べ約50%低く、また最大動作接合温度 $T_{j\text{ MAX.}}$ ではショットキーダイオードより低い。

また、必要な冷却用フィンの熱抵抗を計算すると、LLDは 4.1°C/W 、ショットキーダイオードは 2.7°C/W となる。これはLLDの冷却用フィンの大きさが体積にしてショットキーダイオードの場合の約 $\frac{1}{2}$ でよいということを意味している。

このように、LLDはpn接合高速ダイオードに対しては、発生損失が約50%低く、ショットキーダイオードに対しては $T_{j\text{ MAX.}}$ が 25°C 高いため、いずれに比較しても冷却用フィンの大きさが約 $\frac{1}{2}$ に縮小される(図7)。これはダイオードの実装上、冷却用フィンが装置の主要体積を占めていることを考えると、LLDの大きな利点といえよう。

4 結 言

従来のpn接合ダイオードと同等の逆特性、及び信頼性を持つ浅いpn接合構造による低損失・高速度ダイオードについて述べた。この構造はp層の不純物総量を低くしたダイオードにおける電流導通特性の理論解析に基づいているもので、構造上はpn接合とショットキー接合の中間領域に属する。

本ダイオードにより、従来のpn接合高速ダイオードに比べて発生損失を50%低減させることができた。またショットキーダイオードに比べ、逆耐電圧が高い、冷却用フィンの大きさが $\frac{1}{2}$ に縮小されるなどの利点があり、今後電子計算機の端末機器をはじめ各種直流安定化電源の整流用として幅広い利用が期待される。

参考文献

- 1) M.Naito, H.Matsuzaki, and T.Ogawa: High Current Characteristics of Asymmetrical p-i-n Diodes Having Low Forward Voltage Drops IEEE, Trans. ED-23, 945 (1976)

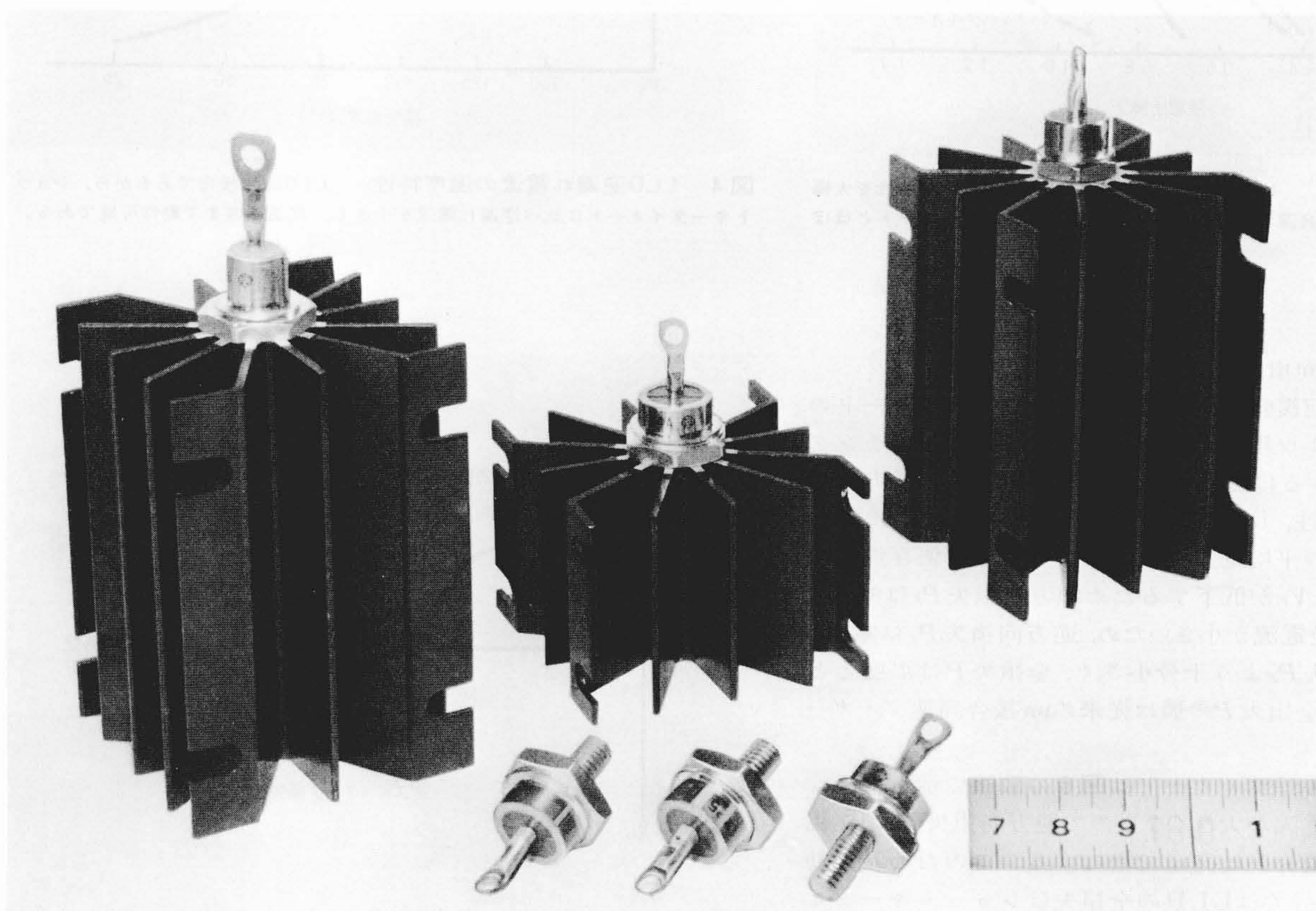


図7 LLDとその冷却用フィン 今回開発したLLD(前列)とその冷却用フィン(後列中央)を示す。LLDの冷却用フィンは、従来のpn接合高速ダイオード(左)、及びショットキーダイオード(右)のフィンに比べ大きさが $\frac{1}{2}$ である。