

# 亚表面齐纳基准二极管可靠性的 $1/f$ 噪声预测方法

庄奕琪 孙 青

(西安电子科技大学微电子研究所 西安 710071)

**摘要** 寿命试验和噪声测试结果表明,亚表面齐纳基准二极管的主要失效模式是经历长时间应力作用后基准电压的突然退化,同时发现失效器件皆为高初始  $1/f$  噪声器件,而且其寿命与初始  $1/f$  噪声电压近似成反比关系.机理分析表明, $1/f$  噪声和基准电压退化均可归因于 p-n 结耗尽区内的位错.据此,可利用  $1/f$  噪声测量对基准二极管的可靠性进行快速且非破坏性的评价.

EEACC: 2530B, 0170N, 7320Z

## 1 引言

随着电子器件可靠性水平的迅速提高,以寿命试验为代表的传统可靠性评价方法所消耗的试验时间、样品数量和加速应力水平越来越大,其局限性变得日益显著.近年来,低频噪声的测量与分析作为一种快速、无损、经济的电子器件质量与可靠性表征的新方法,得到了普遍的关注<sup>[1,2]</sup>,并已用于诊断和预测 VLSI 互连线电迁移、MOS 器件热电子效应、双极晶体管  $h_{FE}$  漂移、电离辐照等引起的失效.亚表面齐纳二极管因具有温漂小、稳定性高、动态电阻低和易集成等特点,在 A/D、D/A、运放、三端稳压器等电路中广泛用作基准电压源,其可靠性的优劣对这些电路的性能有关键性的影响.本文对亚表面齐纳二极管可靠性与其噪声性质的相互关系进行了实验研究和机理探讨,发现  $1/f$  噪声测量可作为一种简便有效的手段,对这种器件进行寿命预测和可靠性加严筛选.

## 2 实验研究

实验样品采用亚表面扩散工艺制造的齐纳二极管,型号为 ZW56,共 100 只,其基准电压范围为 7.0~8.8V,额定工作电流为 5mA,实测开路噪声电压谱密度可表示为

$$S_v(f) = A + B/f^f \quad (1)$$

庄奕琪 男,1957 年生,副教授,主要研究方向为微电子器件噪声物理及其应用技术  
孙 青 男,1929 年生,教授,主要研究方向为半导体器件可靠性物理与表面物理  
1995 年 3 月 27 日收到初稿,1995 年 8 月 14 日收到修改稿

式中  $f$  为频率;  $A$  为白噪声幅度;  $B$  和  $\gamma$  分别为  $1/f$  噪声的幅度和频率指数因子. 用 HP3582A 频谱分析仪、PARC113 低噪声前放和 486 微机组成的自动测试系统测试 2Hz~25.5kHz 范围内的器件噪声频谱  $S_V(f)$ , 经最小二乘法拟合提取  $A$ 、 $B$  和  $\gamma$  的值. 寿命试验采用常温恒流超功率老化, 条件为: 反偏, 恒流  $I_Z=65\text{mA}$ , 功率  $P_D\approx 500\text{mW}$ , 环境温度为室温. 试验总时间为 3000 小时. 试验过程中定时监测被试器件的基准电压  $V_Z$ 、动态电阻  $r_d$  和噪声参数  $A$ 、 $B$ 、 $\gamma$ , 这些参数在试验前的典型值如表 1 所列.

表 1 齐纳二极管初始噪声参数和电参数与器件寿命的相关性

初始参数	相关系数(%)	平均值	标准方差	变异系数(%)
$A/(\text{V}^2 \cdot \text{Hz}^{-1})$	-62.1	$1.89 \times 10^{-14}$	$1.78 \times 10^{-14}$	94
$B/\text{V}^2$	-92.7	$3.88 \times 10^{-12}$	$5.99 \times 10^{-12}$	154
$\gamma$	-66.0	1.08	0.229	21.2
$V_Z/\text{V}$	-33.5	7.357	0.128	1.75
$r_d/\Omega$	-59.1	17.0	3.66	21.5

基准电压  $V_Z$  和噪声参数随电流  $I_Z$  的变化曲线如图 1 所示. 当  $I_Z$  在 0.25~15mA 这样的宽范围内变化时,  $V_Z \sim I_Z$  基本为一直线(即动态电阻  $r_d \equiv \Delta V_Z / \Delta I_Z$  为常数), 说明这种器件只存在一种击穿结构. 当电流小于 1mA 时,  $1/f$  噪声幅度  $B$  与白噪声幅度  $A$  均随电流的增加而下降; 但是, 在电流大于 1mA 的器件主偏置区域内,  $1/f$  噪声与白噪声呈现出两种截然不同的电流特性,  $B$  随电流的上升而几乎成正比地上升, 而  $A$  则随电流的增加而下降. 这充分表现出产生两种噪声分量的物理机构的不同.

基准电压和  $1/f$  噪声参数在寿命试验期间的变化如图 2 所示. ZW56 击穿特性曲线在发生退化前后的典型变化规律如图 3 所示. 可见, ZW56 的主要失效模式是在一定的应力时

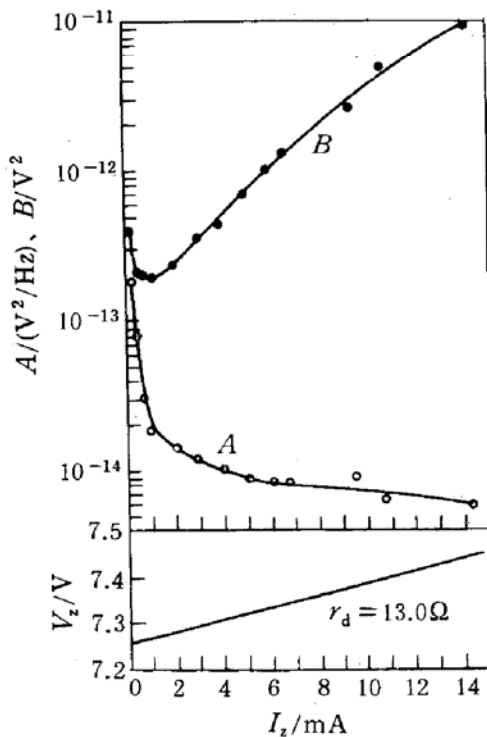


图 1 齐纳二极管基准电压和噪声谱密度随电流的变化

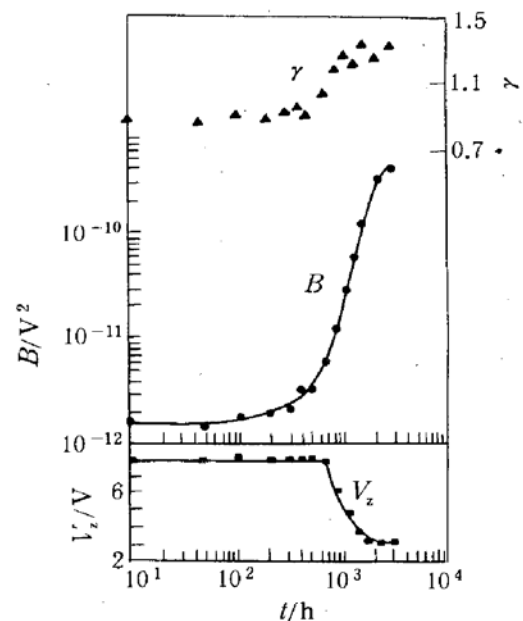


图 2 齐纳二极管基准电压和  $1/f$  噪声参数在寿命试验期间的变化

间作用之后  $V_z$  的急剧退化,属于突发性失效.若失效判据定为  $\Delta V_z/V_{z0} = -20\%$ ,则在所进行的 3000 小时寿命试验中,失效器件占试验器件总数的约 9%.经过对器件失效数据以及电参数与噪声参数测试数据进行统计分析之后,发现齐纳二极管的  $1/f$  噪声与其可靠性密切相关.

首先,失效器件皆为高初始  $1/f$  噪声器件,未失效器件绝大多数为低初始  $1/f$  噪声器件.初始噪声指试验前测试的噪声值.由图 4 可知,尽管初始  $1/f$  噪声大的器件

只占器件总数的一小部分,但几乎全部失效;而初始  $1/f$  噪声低的器件占器件总数的绝

大部分,但在试验中很少失效.换言之,仅当器件噪声高于整批器件噪声的平均值时,才会出现明显的  $V_z$  退化.因此,  $1/f$  噪声测量可用于器件的可靠性加严筛选.筛选判据可选为整批器件  $1/f$  噪声电压的平均值或平均值加方差(由剔除率的高低来定).噪声值高于该判据的器件为相对低寿命品,应予剔除或用于寿命要求不高的场合.对于本研究所用器件,因试验时间所限,未得到寿命大于 3000 小时的器件寿命具体值.若假设噪声小于平均值的器件都与噪声等于平均值的器件具有相同的寿命,则剔除噪声大于平均值的器件(占整批器件的 8%),可使整批器件的失效几率从 9%降低到 1%.

再者,初始  $1/f$  噪声越大,器件的寿命越短.高噪声器件的初始  $1/f$  噪声谱密度与其寿命近似成反比关系,如图 5 所示,噪声高于平均值的齐纳二极管的寿命  $t_L$  可近似用以下经验公式来预测

$$t_L = t_{L0} \left[ \frac{S_V(f)}{S_{V0}(f)} \right]^{-\alpha} \quad (S_V(f) > S_{V0}(f), f < f_L) \quad (2)$$

式中  $S_{V0}(f)$  是整批器件初始  $1/f$  噪声电压谱密度的平均值;  $\alpha$  为一常数;  $f_L$  为  $1/f$  噪声区与白噪声区的转折频率;  $t_{L0}$  为  $S_V(f) = S_{V0}(f)$  时的器件寿命,其大小与器件承受的工作或试验应力条件及失效判据有关.对于本工作采用的实验条件和失效判据,由实测数据提取得到的参数为  $t_{L0} = 3000$  小时,  $\alpha = 0.93$ ,  $S_{V0}(10\text{Hz}) = 3.88 \times 10^{-13} \text{V}^2/\text{Hz}$  ( $f_L = 500\text{Hz} \sim 2.5\text{kHz}$ , 故取  $f = 10\text{Hz}$ ).

而且,初始  $1/f$  噪声与器件寿命的相关性远大于初始电参数及白噪声与寿命的相关

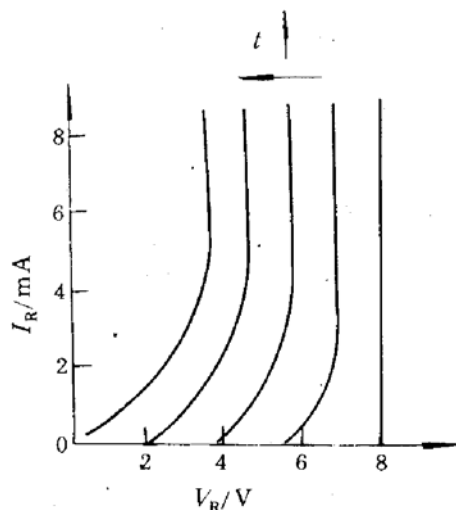


图 3 齐纳二极管击穿特性曲线在  $V_z$  退化前后的变化

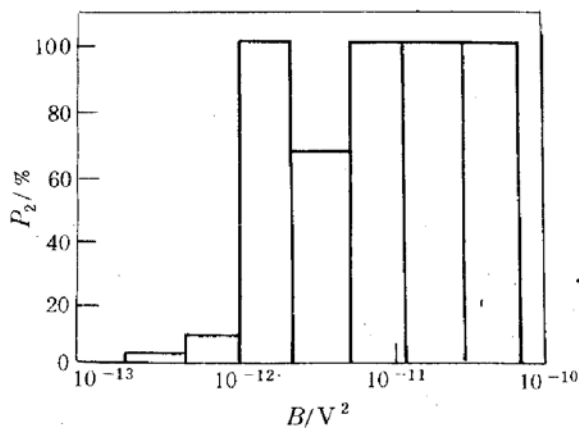
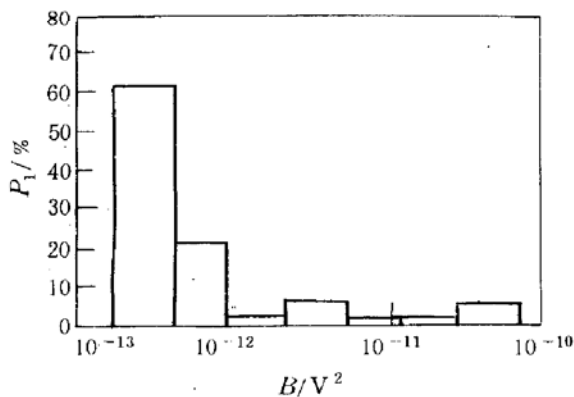


图 4 ZW56 噪声与失效的频度分布

$P_1$  为初始  $1/f$  噪声幅度的几率;

$P_2$  为每个噪声子量级的器件失效几率.

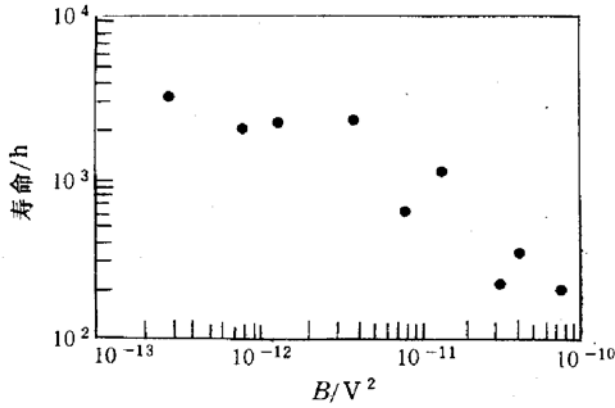


图 5 齐纳二极管寿命与其初始  $1/f$  噪声幅度的关系

的变化,可以判断器件是否已临近失效;通过测试  $1/f$  噪声特性随工作或试验应力的变化,可以确定这种应力是否对器件寿命造成影响,从而为正确选择器件极限工作条件和老化筛选条件提供依据.

### 3 机理分析

对于初始击穿区位于体内的亚表面结构齐纳二极管,击穿电压的不稳定性主要应归因于体内缺陷,特别是位于 pn 结耗尽区的位错.在亚表面工艺中,要进行高浓度的磷扩散以形成  $n^+$  区.由于磷与硅的原子半径不匹配,加之扩散进硅的磷浓度往往接近甚至超过了它在硅中的固溶度,极易形成失配位错.处于 pn 结耗尽区内的位错一旦被重金属杂质缀饰,就会形成沿位错线的电场局部集中,造成局部首先击穿,导致击穿电压的下降.这通常称为微等离子击穿,其典型的击穿特性曲线见图 6.位错周围存在弹性应力场以及位错核心具有不饱和键,使得重金属杂质与位错之间有很强的亲和力;同时,重金属杂质属于“快”扩散杂质,在不太高的温度下在硅中就有很大的扩散系数,如铁杂质在  $100^\circ\text{C}$  时的扩散系数值可达  $10^{-12}\text{cm}^2/\text{s}$ <sup>[3]</sup>,大约相当于磷杂质在  $1100^\circ\text{C}$  时的扩散系数值.这样,在器件使用或者试验过程中,在较高的结温作用下,并经历了足够长的时间周期,原来位于位错附近的重金属杂质会逐渐沉积于位错线上,使得器件的击穿电压逐渐下降.这很可能是非表面击穿机构的稳压二极管基准电压退化的主要原因.

在出现微等离子击穿的同时,会形成所谓微等离子噪声<sup>[4]</sup>.这种噪声的特征是其谱密度与频率的  $1\sim 2$  次方成反比<sup>[5]</sup>,而且随电流的变化呈现局部尖峰<sup>[6]</sup>.因此,噪声特性的测量亦可作为微等离子区是否形成的一个辅助判据.应该看到,微等离子噪声与正偏 pn 结的猝发噪声的

性,对试验测试数据的统计分析结果如表 1 所列.这说明,  $1/f^\gamma$  噪声对导致器件失效的潜在缺陷更为敏感.造成这种强相关性的物理起因将在下一节进行讨论.

此外,  $1/f$  噪声的变化可视为器件即将失效的一种预兆.如图 2 所示,在器件电参数 ( $V_z$ 、 $r_d$ ) 尚未变化时,  $1/f$  噪声密度首先明显上升,随之  $\gamma$  因子也开始增加,然后才发生  $V_z$  退化.根据电子器件噪声理论<sup>[2]</sup>,  $1/f$  噪声幅度的改变表明器件结构开始发生变化,  $\gamma$  因子的增加表明器件结构已发生了不可拟的变化,即破坏性已经产生.因此,通过监测  $1/f$  噪声特性随时间的

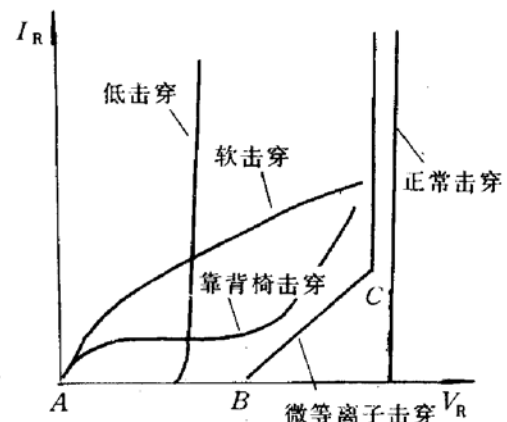


图 6 pn 结击穿特性曲线

物理起源非常相似. 对于正偏 pn 结, 纯净位错引起的  $1/f$  噪声当位错被重金属杂质缀饰后很可能成为猝发噪声<sup>[7]</sup>; 对于击穿 pn 结, 纯净位错引起的  $1/f$  噪声当位错被缀饰后则成为微等离子噪声.

ZW56 是采用扩散工艺制作的亚表面稳压二极管, 故其基准电压的退化主要应归因于重金属杂质对于 pn 结耗尽区位错的沉积, 即出现了微等离子击穿. 其实验根据体现在以下两个方面: 其一, 从击穿  $I-V$  特性的变化来看, 表面缺陷引起的击穿特性通常较软, 而且漏电流较大; 诸如光刻窗口不规则、结面不平等工艺偏差引起的低击穿特性则较硬; 位错引起的微等离子击穿往往迭加在正常击穿特性之上, 有一段起始电压(如图 6 中 A→B 段), 且常有雪崩击穿的转折点(如图 6 中 C 点). 将图 3 所示的 ZW56 发生基准电压退化之后的击穿特性曲线与图 6 的特性曲线加以比较, 可知它具有明显的微等离子击穿的特征. 其二, 从噪声特性的变化来看, 在出现基准电压退化的同时,  $1/f^\gamma$  噪声的幅度急剧上升, 而且其指数因子  $\gamma$  从 1 增加到 1.6 左右, 如图 2 所示; 同时, 对于退化严重的器件观察到了噪声幅度随  $I_2$  的涨落变化. 这些事实表明出现了微等离子噪声, 而且其强度逐渐压倒了  $1/f$  噪声, 成为占支配地位的噪声机构. 由此, 可以认为, ZW56 的基准电压退化是由于重金属杂质沿位错线的沉积引起的.

尽管对正偏或反偏 pn 结的  $1/f$  噪声已做了大量的研究, 击穿状态下 pn 结  $1/f$  噪声的产生机构尚未完全搞清楚. 一般认为, 影响击穿 pn 结  $1/f$  噪声的因素与非击穿 pn 结  $1/f$  噪声的因素应该是一致的, 即可分为基本  $1/f$  噪声和由表面  $1/f$  噪声、位错  $1/f$  噪声构成的非基本  $1/f$  噪声两类<sup>[8]</sup>. 从图 4(a) 可知, 具有强  $1/f$  噪声的 ZW56 管只占整批器件总数的很小一部分, 因此其  $1/f$  噪声属于由器件不完整性引起的非基本  $1/f$  噪声. 在击穿状态下, 界面陷阱电荷的涨落会引起 pn 结表面电场的变化, 导致击穿电压的涨落, 形成表面  $1/f$  噪声; 类似地, 位错陷阱电荷的涨落也会引起体内 pn 结耗尽层局部电场的变化, 导致击穿电压的涨落, 形成位错  $1/f$  噪声. 显然, 对于表面型稳压管而言, 表面  $1/f$  噪声是主要的; 而对于 ZW56 这样的亚表面稳压二极管, 位错  $1/f$  噪声是主导机构. 这已为一些实验所证实, 如据 S. Lui 等人报道<sup>[9]</sup>, 离子注入背吸杂工艺(只减少体缺陷)可降低亚表面齐纳二极管的  $1/f$  噪声达一个数量级. V. Mikolaj 等人的实验结果表明<sup>[5]</sup>, 表面击穿区的  $1/f$  噪声的电流特性与亚表面击穿区的  $1/f$  噪声电流特性不同. 我们得到的  $1/f$  噪声的电流特性(图 1)与后者基本一致, 故可认为它主要是由体缺陷即位错引起的.

根据以上分析, 可以对实验发现的 ZW56 初始  $1/f$  噪声与其基准电压退化的强相关性做出解释. 既然 ZW56 的  $1/f$  噪声是由位于 pn 结耗尽区的位错引起的, 而其基准电压的退化则是由于在一定的温度与时间应力作用下重金属杂质逐渐在位错上淀积所致, 二者必然密切相关. 位错密度越大的器件, 其  $1/f$  噪声就越大, 同时基准电压退化越容易发生, 退化程度也越大. 因此,  $1/f$  噪声的大小可用于表征由基准电压退化这一模式决定的器件失效几率及平均寿命的大小. 这一理论估计已为我们得到的实验结果证实.

特别应该注意到, 在器件使用前或试验前的初始状态, pn 结耗尽层中的位错可以认为有相当一部分是“清洁”的, 即尚未被重金属杂质所缀饰. 研究结果表明, 这种“清洁”的位错对器件的电特性(如击穿电压、反向电流)没有显著影响<sup>[10]</sup>, 却是重要的  $1/f$  噪声源<sup>[11,12]</sup>, 其密度近似与  $1/f$  噪声强度成正比. 因此, 正如表 1 所列实验数据揭示的那样, 基准电压退化与器件初始电参数的相关性远小于它与初始  $1/f$  噪声电压的相关性.

## 4 结论

亚表面齐纳二极管的主要失效模式是基准电压的退化,其退化后的击穿机构很可能是微等离子击穿.该器件的  $1/f$  噪声与其基准电压的退化密切相关,主要表现在:仅当器件噪声高于整批器件平均值时,才会出现明显的基准电压退化;失效器件寿命与其初始  $1/f$  噪声幅度近似成反比关系;寿命与  $1/f$  噪声参数的相关性远大于与电参数以及其它噪声参数的相关性.理论分析表明, $1/f$  噪声和基准电压退化均可归因于 pn 结耗尽区内的位错,纯净的位错引起  $1/f$  噪声,被重金属杂质缀饰的位错引起基准电压的退化.这些研究结果为利用  $1/f$  噪声对基准二极管进行寿命预估和可靠性筛选提供了依据.

## 参 考 文 献

- [1] B. K. Jones, *Advances in Electronics and Electron Physics*, **87**, Academic Press, Inc., 1994, 101~204.
- [2] 庄奕琪,孙青,半导体器件中的噪声及其低噪声化技术,国防工业出版社,1993.
- [3] B. O. Kolbesend and H. P. Strunk. *VLSI Electronics; Microstructure Science*, Academic Press, 1985, **12**(4):143~223.
- [4] N. Ellouze, J. C. Hoffmann and B. Lacaze. *J. Appl. Phys.*, 1978, **49**(1):297~300.
- [5] V. Mikolaj, J. Belan, K. Vojtechovsky and F. Strapko. *Solid-State Electron.*, 1989, **32**(11):983~991.
- [6] K. F. Knott, *Proc. IEEE*, 1970, **58**(2):368~369.
- [7] S. T. Hsu, R. J. Whitter and C. A. Mead, *Solid-State Electron.*, 1970, **13**(7):1055~1071.
- [8] A. Van der Ziel, *Proc. IEEE*, 1988, **16**(3):233~258.
- [9] S. Lui, R. G. Meyer and N. Kwan, *IEEE J. Solid-State Circuits*, 1979, **SC-14**(4):782~784.
- [10] C. T. Green and B. K. Jones. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 1985, **18**(1):77~91.
- [11] M. Mihaila and K. Amberiadis, *Solid-State Electron.*, 1983, **26**(2):109~113.
- [12] M. Mihaila, K. Amberiadis and A. Van der Ziel, *Solid-State Electron.*, 1984, **27**(7):675~676.

## 1/f Noise as Reliability Prediction for Subsurface Zener Reference Diodes

Zhuang Yiqi and Sun Qing

(*Microelectronics Institute, Xidian University, Xi'an 710071*)

Received 27 March 1995, revised manuscript received 14 August 1995

**Abstract** It is shown by the accelerated lifetime test and noise measurement for subsurface zener reference diodes that their failure is caused by the degradation of reference voltage. It is found that all failure devices have high initial  $1/f$  noise, and their lifetime are inversely proportional to the initial noise amplitude. The physical mechanisms of the  $1/f$  noise and the reference voltage degradation may be attributed to the dislocations located in the space-charge region of p-n junction. Based on the results,  $1/f$  noise measurement can be used as a fast and non-destructive tool to evaluate the lifetime of zener reference diodes.