

A STACIONER TERMIKUS LETÖRÉS GERMÁNIUMBAN ÉS SZILÍCIUMBAN

DEMETER SÁNDOR és PATAKI GYÖRGY
MTA MŰSZAKI FIZIKAI KUTATÓ INTÉZET, BUDAPEST

[Beérkezett 1971. július 28-án]

A dolgozatban különböző fajlagos ellenállású Ge és Si mintában vizsgáltuk a stacioner termikus letörés jelenségét. Meghatároztuk a letöréshez szükséges kritikus feszültség, áram és teljesítmény hőmérséklet függését. A kapott kísérleti eredményeket igen jól lehetett értelmezni a töltéshordozók mozgékonyságának és a tiltott sáv hőmérsékletfüggésének figyelembevételével.

Jelölések

σ = fajlagos vezetőképesség,	p = lyukkonzentráció,
T = hőmérséklet,	n_i = intrinsic koncentráció,
U = feszültség,	N_d = donorkonzentráció,
q = a minta keresztmetszete,	W_g = tiltott sáv szélessége,
l = a minta hossza,	μ_n = elektronmozgékonyosság,
β = hőelvezetési együttható,	μ_p = lyukmozgékonyosság,
F = a minta felülete,	k = Boltzmann állandó,
T_0 = környezeti hőmérséklet,	I_k = áram a termikus letörési csúcsban,
I = áram,	U_k = feszültség a termikus letörési csúcsban,
T_k = kritikus hőmérséklet a termikus letörési csúcsban,	N_k = teljesítmény a termikus letörési csúcsban,
n = elektronkoncentráció,	R_T = terhelő ellenállás,
	R_M = minta ellenállása.

Bevezetés

A félvezetők termikus letörésének elmélete a dielektrikumok letörésének elméletén alapszik [1], [2]. Az első vizsgálatokat réteg és tűs diódákra végezték el [3]. A probléma részletes analízise még stacioner esetben is nagyon bonyolult, ezért egyszerűsítő feltevéseket kell tenni: bevezetik a minta effektív hőmérsékletét, a mintán belüli hővezetést így figyelmen kívül lehet hagyni. A minta hővesztése a Newton-féle lehülési törvénnyel írható le. A Newton-féle lehülési törvény használhatóságát R. E. Burgess mutatta meg elméletileg [4].

Az áram-feszültség karakterisztikák alakját döntő módon a fajlagos vezetőképesség hőmérsékletfüggése határozza meg. Az első dolgozatokban a fajlagos vezetőképességre exponenciális hőmérsékletfüggést tételeztek fel:

$$\sigma = A \exp \left(- \frac{B}{T} \right).$$

Ezzel a σ -val nem lehet magyarázni a stacioner áramfeszültség-karakterisztikák, $dU/dI = 0$ csúcsaihoz tartozó teljesítményeknek a környezeti hőmérséklet függvényében való csökkenését.

Ennek kiküszöbölésére Senderikhin a vezetőképességet:

$$\sigma = \sigma_0 + A \exp \left(\frac{B}{T} \right)$$

formában veszi fel [5]. Ezzel már magyarázható volt, miért csökken a diódák sztatisztikus karakterisztikáinak csúcsteljesítménye a környezeti hőmérséklet növelésével. A stacioner termikus letörés pontos vizsgálatánál figyelembe kell venni a töltéshordozók mozgékonyságának, és a tiltott sáv szélességének hőmérsékletfüggését is. Ez csak az utóbbi időkben történt meg germániumra [6].

Jelen dolgozatban kísérletileg vizsgáljuk a Si és Ge stacioner termikus letörését a környezeti hőmérséklet függvényében. A kapott görbéket két paraméter megválasztásával összehasonlítottuk az elméleti számításokkal, kiindulva a [6] dolgozat tárgyalásából.

A $dU/dI = 0$ csúcsnál mért csúcsáram, csúcsfeszültség és csúcsteljesítmény hőmérsékletfüggése jó egyezést mutat az elméletileg számolt értékekkel.

A stacioner termikus letörés elmélete

A termikus egyensúly egyenlete:

$$U^2 \sigma \frac{q}{l} = \beta F (T - T_0), \quad (1)$$

ahol a bal oldal az időegységenként betáplált hőmennyiséget, a jobb oldal az időegységként elvezetett hőmennyiséget jelenti. Az (1)-ben F , l , q a minta felülete, hossza; ill. keresztmetszete, β a minta és környezete közti hőelvezetési együttható, T a minta, T_0 a környezet hőmérséklete. Míg ez az egyenlőség a sztatisztikus áramfeszültség-karakterisztika minden pontjára vonatkozik, addig az adott T_0 -hoz tartozó áramfeszültség-karakterisztika $dU/dI = 0$ csúcsára vonatkozó feltételi egyenlet (lásd pl. [6] dolgozat):

$$\left(\frac{\sigma}{d\sigma} \right)_{T_k} = T_k - T_0, \quad (2)$$

ahol T_k a minta hőmérséklete a karakterisztika $dU/dI = 0$ pontjában. Az egyenlőségből látható, hogy a karakterisztika-csúcsban a minta hőmérséklete nem függ a minta tömegétől m ; fajhőjétől c_v ; méreteitől l , q , F , és a β hőelvezetési

tési együtthatótól. A karakterisztika-csúcs hőmérsékletét a fajlagos vezetőképességen σ -n keresztül az N_d szennyezési koncentráció, W_g tiltott sáv szélesség, valamint a T_0 környezeti hőmérséklet határozzák meg. Könnyen belátható, hogy a stacioner áramfeszültség-karakterisztika $dU/dI = 0$ csúcsa mindig magasabb hőmérsékletű, mint a fajlagos vezetőképesség minimumának hőmérséklete.

A (2) egyenletet grafikusán oldjuk meg. Ábrázoljuk a $\sigma/(d\sigma/dT)$ görbéket, és elmetsszük a $T - T_0$ egyenesekkel. A metszéspontok az illető környezeti hőmérsékletekhez tartozó $dU/dI = 0$ csúcsok T_k hőmérsékletét adják meg.

Az 1. és 2. ábrák a $\sigma/(d\sigma/dT)$ görbék seregét mutatják n -típusú, különböző szennyezettségű germániumra és szilíciumra, kiindulva az ismert $\sigma = e(n\mu_n + p\mu_p)$ összefüggésből, ahol n , p , illetve μ_n , μ_p az elektronok és lyukak koncentrációja, ill. mozgékonyága, míg e az elektrontöltés abszolút értéke. A görbék számításánál a következő összefüggéseket használtuk fel [7]:

a. germániumra:

$$n = \frac{N_d}{2} \left[1 + \left(1 + \frac{4n_i^2}{N_d^2} \right)^{1/2} \right],$$

$$p = \frac{2n_i^2}{N_d} \left[1 + \left(1 + \frac{4n_i^2}{N_d^2} \right)^{1/2} \right]^{-1},$$

$$n_i^2 = 2,352 \cdot 10^{30} \cdot T^3 \exp \left[- \frac{W_g(T)}{kT} \right] [\text{cm}^{-6}],$$

$$W_g(T) = 0,782 - 3,9 \cdot 10^{-4} \cdot T \quad [\text{eV}],$$

$$\mu_n = 4,9 \cdot 10^7 \cdot T^{-1,66} \quad [\text{cm}^2 \text{V}^{-1} \text{sec}^{-1}],$$

$$\mu_p = 1,05 \cdot 10^9 \cdot T^{-2,33} \quad [\text{cm}^2 \text{V}^{-1} \text{sec}^{-1}].$$

b. szilíciumra:

Az n elektron és p lyukkonzentráció képlete természetesen ugyanaz, mint germániumnál, míg

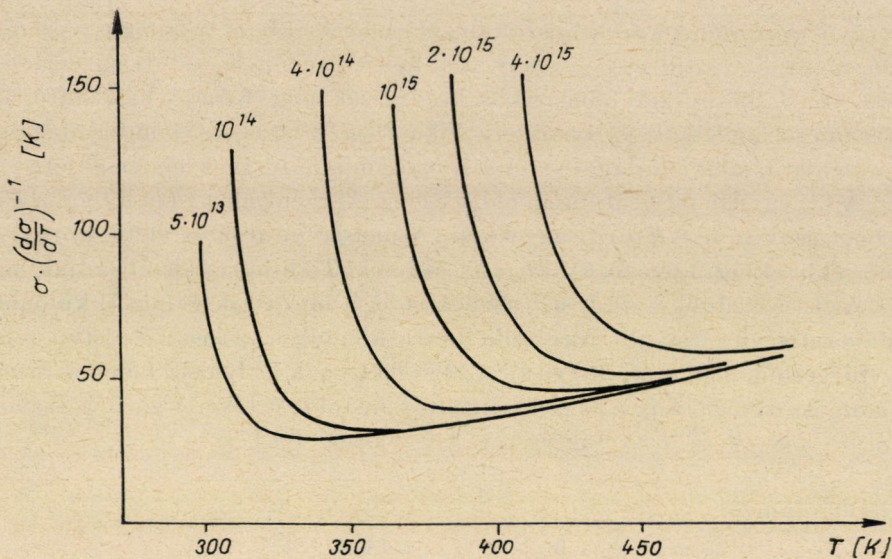
$$n_i^2 = 1,06 \cdot 10^{31} \cdot T^3 \exp \left[- \frac{W_g(T)}{kT} \right] [\text{cm}^{-6}],$$

$$W_g(T) = 1,205 - 2,8 \cdot 10^{-4} \cdot T \quad [\text{eV}],$$

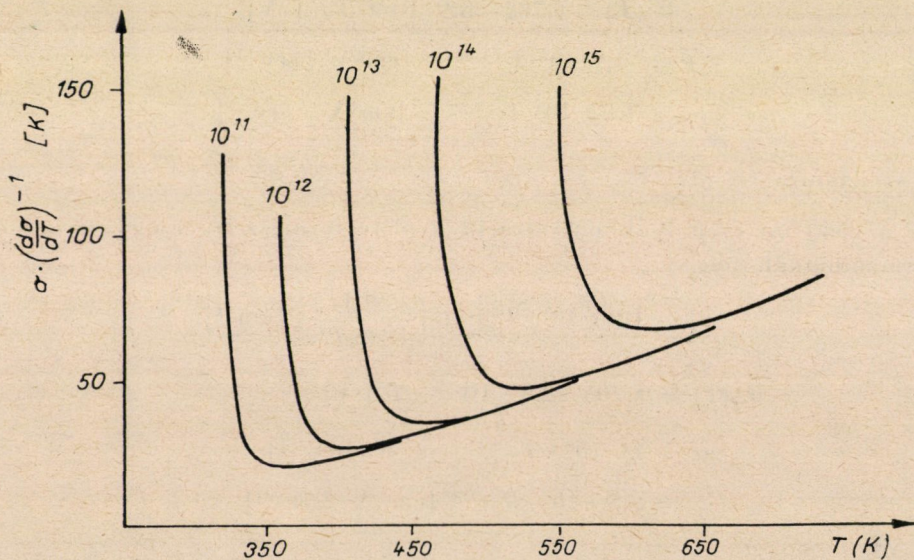
$$\mu_n = 4 \cdot 10^9 \cdot T^{-2,6} \quad [\text{cm}^2 \text{V}^{-1} \text{sec}^{-1}],$$

$$\mu_p = 2,5 \cdot 10^8 \cdot T^{-2,3} \quad [\text{cm}^2 \text{V}^{-1} \text{sec}^{-1}].$$

A fenti formulákban a T hőmérsékletet mindenütt Kelvin fokokban kell beírni.



1. ábra. Különbözően adalékolt Ge $\sigma/(d\sigma/dT)$ görbéi a minta T_k letörési hőmérsékletének meghatározásához. A görbék melletti értékek az N_d donor koncentrációt adják cm^{-3} egységekben.



2. ábra. Különbözően adalékolt Si $\sigma/(d\sigma/dT)$ görbéi a T_k letörési hőmérséklet meghatározásához. A görbék melletti értékek az N_d donor koncentrációt adják cm^{-3} egységekben.

A T_k csúcshőmérséklet ismeretében az (1) termikus egyensúly egyenletből az alábbi

$$I_k = \sqrt{\beta F \frac{q}{l} \cdot \sigma_{T_k} (T_k - T_0)}, \quad (3)$$

$$U_k = \sqrt{\beta F \frac{l}{q} \cdot \frac{T_k - T_0}{\sigma_{T_k}}}, \quad (4)$$

$$N_k = \beta F (T_k - T_0) \quad (5)$$

összefüggések számolhatók, ahol I_k , U_k , N_k a $dU/dI = 0$ csúcsnál mérhető áram, feszültség és a hozzátartozó teljesítmény.

Kísérleti technika

A méréseket áramgenerátoros üzemmódban végeztük, melynél teljesül az $R_T \gg R_M$ feltétel. Itt R_T az áramot meghatározó ellenállás, R_M a minta ellenállása. A nagy R_T ellenállás a minta pillanatnyi ellenállásváltozásaitól függetlenül konstans áramot kényszerít az áramkörre, és megakadályozza az áram megfutását. Így kimérhető a sztatikus áram-feszültség-karakterisztika negatív ellenállású szakaszának jelentős tartománya.

A környezeti hőmérsékletet ultratermosztáttal állítottuk be $\pm 0,5$ °C pontossággal. A mintákat a termosztát légterébe helyeztük, így a hőelvezetés kicsi volt. Az áram-feszültség-karakterisztikák kimérése n -típusú 2 Ω cm, 8 Ω cm, 10 Ω cm és 32 Ω cm-es germánium, illetve n -típusú 1,5 Ω cm és 340 Ω cm-es szilícium mintákon történt.

Mérési eredmények és kiértékelésük

A stacioner termikus letörés elméletének és a kísérleti eredményeknek az egyeztetését mind Ge-ra, mind Si-ra elvégeztük.

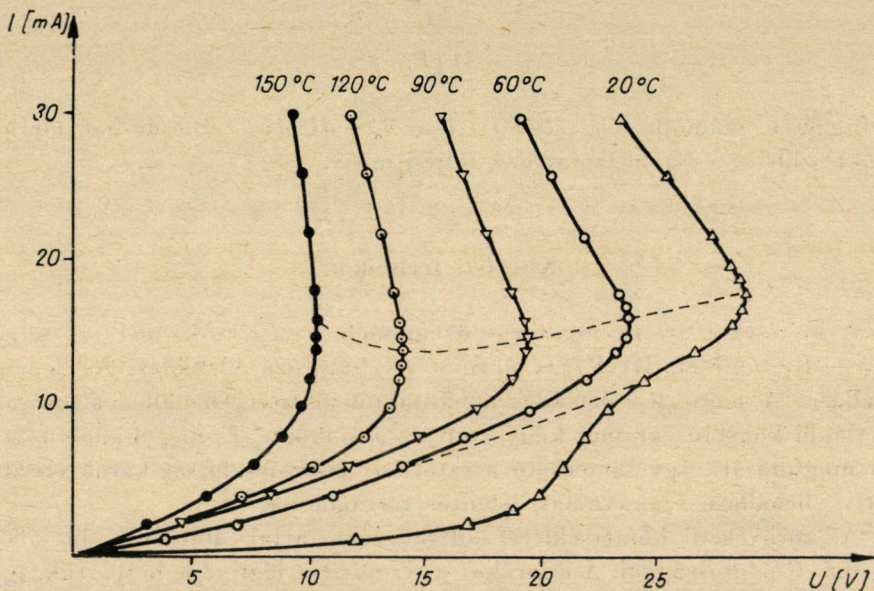
Itt a 340 Ω cm-es szilícium mintára vonatkozó eredményeket ismertetjük.

A minta stacioner áram-feszültség-karakterisztikái a 3. ábrán láthatók. A (3); (4) és (5) képletek segítségével kiszámoltuk az

$$I_k = I_k(T_0), \quad U_k = U_k(T_0), \quad N_k = N_k(T_0)$$

függvényeket. A számított görbéket a 4. ábra folytonos vonalai ábrázolják. A körök és háromszögek a kísérletileg mért értékeket jelölik. A számolásnál felhasznált $\beta F q/l$ és $\beta F l/q$ konstansokat (β értékét a vizsgált hőmérséklettartó-

mányban állandónak tekintettük) a $T_0 = 393 \text{ °K}$ környezeti hőmérsékleten kimért sztatikus áram-feszültség-karakterisztika csúcsáramából és csúcsheszültségéből számoltuk. Ennél a pontnál történt a számított és mért görbék illesztése. Látható, hogy a kísérletileg vizsgált hőmérsékleti tartományban az $I_k(T_0)$, $U_k(T_0)$, $N_k(T_0)$ görbék kielégítően követik a számított görbék menetét. Sajnos, a vizsgált tartományban nem lehetett kimérni az $N_k(T_0)$ minimumát.



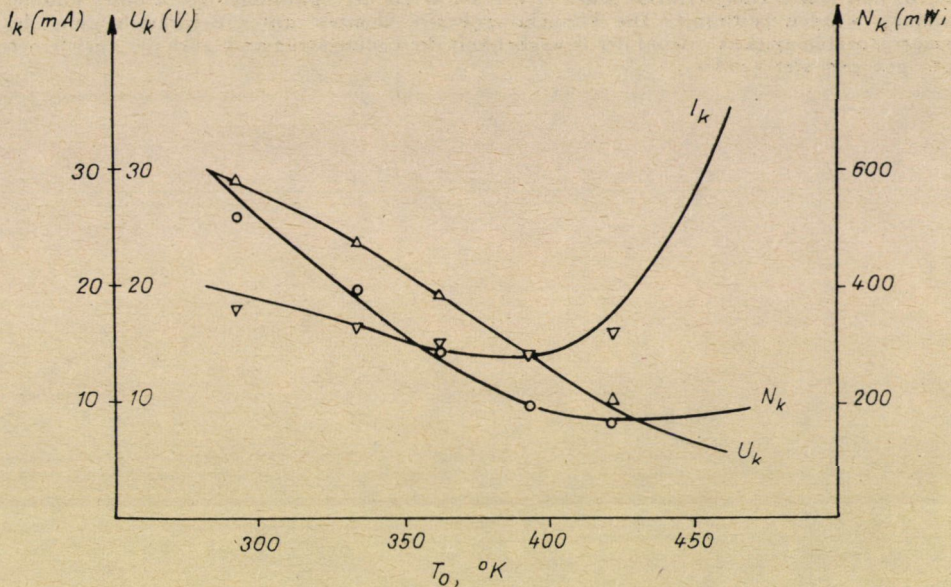
3. ábra. A $340 \Omega \text{ cm}$ -es szilícium minta sztatikus áram-feszültség-karakterisztikái különböző környezeti hőmérséklet esetén.

Érdeemes megjegyezni, hogy az áram-feszültség-karakterisztika stacioner esetben nem mutat teljes S alakot. Az áramot a csúcsáram ötszörösére növelve a karakterisztika nem fordult ismét pozitívba.

A 3. ábrán látható, hogy $T = 293 \text{ °K}$ környezeti hőmérsékletéhez tartozó áram-feszültség-karakterisztika eltér a szaggatott vonallal behúzott, várt áram-feszültség-karakteristikától.

Mivel a minta kevéssé szennyezett, nagy $\Omega \text{ cm}$ -es, feltehető, hogy az Sb—Au ötvözött kontaktusok a mintán nem adnak ohmos kontaktusokat. A kontaktusoknál feltételezhető $p-n$ átmenetek közül az egyik nyitó, másik záró irányba van előfeszítve. A feszültség növelésekor, a feszültség nagy része a záró irányba előfeszített $p-n$ átmenetre esik, és csak a maradék része jut a mintára. Elég nagy feszültségeknél ez a záróirányú átmenet letörik, az áram megnő, és a minta össz-feszültségét most már a minta saját ellenállása szabja meg. Magasabb környezeti hőmérsékleteknél ez a jelenség eltűnik.

Megfelelő feltételek mellett (alacsony hőmérséklet, feszültséggenerátoros üzemmód) a mozgékonyág hőmérsékletfüggése N alakú I — V karakterisztika kiméréséhez vezethet. Az N karakterisztika $dI/dU = 0$ minimuma a σ minimum előtt jelentkezik. Mivel azonban a $\mu = \mu(T)$ által megadott mozgékonyág-változás gyenge, az N karakterisztika minimuma kevésbé határozott, mint a stacioner termikus letörés feszültségmaximuma.



4. ábra. A U_k ; I_k ; és N_k értékek környezeti hőmérsékletfüggése. A folytonos vonal az elméletileg számított értékeket mutatja.

A stacioner termikus letörésnél felhasznált számítások alkalmazhatók arra az esetre is, amikor a koncentrációváltozás mély csapdák kiürülésével kapcsolatos. Újabban GaP termikus letörését vizsgálták hasonló módon a [8] dolgozatban.

IRODALOM

1. S. WHITEHEAD: Dielectric Breakdown of Solids, Oxford (1951).
2. J. J. O'DWYER: The Theory of Dielectric Breakdown of Solids, Oxford (1964).
3. S. BENZER: *J. Appl. Phys.*, **20** 804 (1949).
4. R. E. BURGESS: *Proc. Phys. Soc.*, **68/B** 908 (1955).
5. I. M. SENDERIKHIN: *Fiz. Tverd. Tela*, **2** 1506 (1960).
6. I. M. SENDERIKHIN: *Izv. Vuzov. USSR Fizika* N^o. **9** 144 (1967).
7. R. A. SMITH: *Semiconductors*, Cambridge (1961).
8. K. SOMOGYI: *Acta Physica Hung.*, **29** 383 (1970).

Stationary Thermal Breakdown in Ge and Si. The authors report on examinations of the stationary thermal breakdown in Ge and Si specimens with various specific resistances. They determined the critical values of voltage, current and power required for the breakdown. The experimental results could be interpreted very well, taking into consideration the temperature dependence of charge carrier mobility and of the forbidden gap.

Stationärer thermischer Durchschlag in Ge und Si. Die Verfasser berichten über Untersuchungen betreffend die Erscheinung des stationären thermischen Durchschlags in Ge- und Si-Probekörpern mit verschiedenem spezifischem Widerstand. Die Temperaturabhängigkeit der für den Durchschlag erforderlichen kritischen Werte der Spannung, des Stromes und der Leistung wurden bestimmt. Die Versuchsergebnisse konnten unter Berücksichtigung der Temperaturabhängigkeit sowohl der Beweglichkeit der Ladungsträger als auch der verbotenen Zone gut gedeutet werden.