

# 鑽石的熱生電及電吸熱效應：尖端奈米科技的奇蹟

宋健民

中國砂輪企業股份有限公司

e-mail: [sung@kinik.com.tw](mailto:sung@kinik.com.tw)

## 摘 要

「無晶鑽石」或「奈米碳管」製成的「電子槍陣」可以在真空中發射大量的電流。這種鑽石「場發射面」可以製成太陽電池，其發電效率可數倍於目前最先進的半導體產品(如砷化鎵)。尤有進者，鑽石「電子槍陣」也可製成「靜態發電機」使用傳統的能源發電。鑽石「電子槍陣」也可以電子「蒸發散熱」(Electron Radiator)，其冷卻效率可超過傳熱最快的固體散熱片(鑽石本身)，因此可用以突破目前高功率 IC 面對的高溫瓶頸。鑽石「電子槍陣」也可製成微機電(MEM)的超小冰箱。這些匪夷所思的用途將使目前浮上檯面的「奈米科技」如虎添翼，加速人類邁向物質文明的顛峰 - 「鑽石時代」。

## 能源的選擇

能量的種類繁多，包括核能、化學能、動能、位能、電能及機械能等。種種的能源中以電能最易儲存及輸送，可以輕易的產生各種功能，包括照明、傳播、保溫、運輸、計算及動作等。人類駕馭電能後才創造了物質文明。但物質文明使人類對電能的需求更加殷切。不幸的是以任何其他能源轉換成電能都會遭遇到熱力學第二定律的阻力(見下述)。其結果是不僅電能轉換不全，而且會造成環境污染(即熱力學的「熵值」會因不平衡的變化而提高)。除此之外，多種能源也有耗竭之虞。所以目前的諸般發電方法並沒有萬全之策。

以傳統的化學能源(如煤、石油、天然氣)發電會產生大量的廢氣，不僅開採能源時會破壞環境。

排出的煙霧也危害人體的健康。產生的酸雨更造成建築的腐蝕及生物的死亡。除此之外，大氣內二氧化碳的提高還會使「溫室效應」(Green House Effect)加劇。例如南極的氣溫自 1940 年代開始就每二十年增加 1 度，夏天的熱氣流已使南極冰棚不斷崩解(圖一)，如果極地的冰凍平原持續融化，全球的海平面會因而上昇並淹沒沿岸低窪的區域。更有甚者，廢氣的排放也使南極上空的臭氧層破開了一個比美國面積還大的空洞，由於太陽光沒有受到阻攔，強烈的紫外線可以長驅直入照射到地面，南半球居民罹患皮膚癌的機率因而大增。

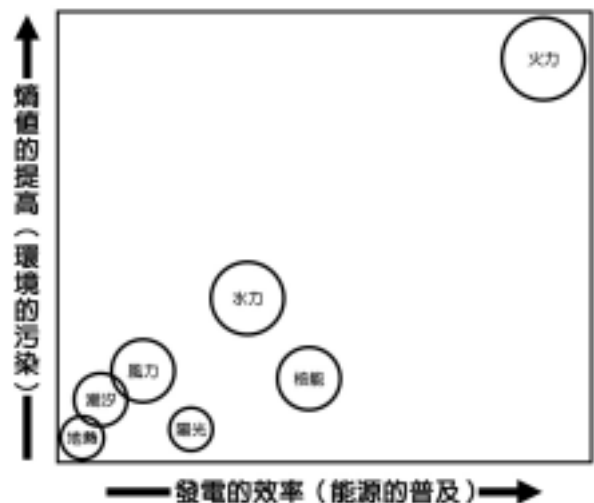


圖一：大量燃燒化石燃料會促成極地冰雪的過度融解而使海平面持續上昇。圖示 2002 年的三月間，南極半島東岸外側的 Larsen B 冰棚(圖右海水掩蓋處)就崩解了三千餘平方公里，使五億噸的冰水貫入海中。

以較先進的分裂式核能發電則因其廢料會長期輻射乃受到環保人員的杯葛。但是核子的結合能(MeV)比原子的結合能(eV)高上百萬倍，所以核燃料的體積比化學燃料者小約百萬倍。核能發電的固體廢料其「熵值」也比氣體者小約千倍，所以核能發電對環境傷害的程度會比化學能發電要小得多。火力發電與核能發電的差別可以稻草和煤球昇火取暖為比較。前者燃燒起來是煙霧迷漫，後者則是無煙但有毒(一氧化碳)。煙霧毒不殺人但會讓多人生病及短命。一氧化碳會致命卻可以有效隔離避免。雖然火力發電比核能發電所冒的險更大，許多國家卻仍禁止使用核能發電。上述的化學能及核能發電其礦源未來數十年之內都會用罄，所以它們都不是未來主要的能源。

以位能(如水力)發電不僅投資浩大(如長江三峽大壩)而且對生態有毀滅性的影響(如鮭魚無法溯江而上產卵)，加上冒上崩堤氾濫的危險(如對日

抗戰的炸壩事件)，因此亦非發電的良策。至於風力發電也碰到氣候無法預測的問題，發電的成本仍然偏高。風力發電用地很廣常會造成濫墾也使環保亮起紅燈。其他較少用的發電方法也各有其缺點。例如地熱發電不僅可遇而不可求，而且功率也甚低，所以不切實際。而潮汐發電更是困難重重，難以應用。至於地球上唯一號稱取之不盡的乾淨能源 - 「氫融合」仍在研究階段。其可能應用的時程則是遙遙無期。



圖二：各種能源的發電效率及其對環境污染的相對程度。

各種能源的原動力都來自星球。恆星的質量若不及太陽的 1.4 倍，其氫氣融合的終極元素為氦。更大的恆星內氦會持續融合出碳、氧、矽等元素。等到合成出核子結合能最大的鐵元素後，融合就會停止。但這時巨星會因重力崩潰而爆炸形成超新星(Supernova)。爆炸的能量會使鐵持續融合至產生出不穩定的放射性元素(如鈾、鐳)為止。故地球上的核能原料(如鈾、鈾)乃來自超新星(Supernova)

內元素的過度融合。地球內部的放射性元素在分裂後其熱能促成了地套(Mantle)的對流,並進而帶動了地殼板塊的運動及其上大陸的飄移。板塊之間的推擠隆起了高山(如喜瑪拉雅山脈)並噴出了熔岩。後者乃成為溫泉及地熱的來源。除了核能及地熱外,其他的能源都直接或間接與太陽有關。

### 太陽的能源

太陽能的一小部分乃被植物用來進行光合作用,使二氧化碳和水合成碳水化合物(如蔬菜及水果),並釋放出氧氣。部份的碳水化合物成為動物,包括人類的食物。另一部份則被砂土掩埋變成化石燃料(Fossil Fuel),包括煤、石油及天然氣。這些化石燃料與植物放出的氧氣化合乃成為今日發電的主流及其他支撐文明的能源(如汽車的動力或居家的暖氣)。太陽是一切能源之母,它不僅提供了化石燃料,並藉植物放出的氧使其可以燃燒產生熱量。太陽光也蒸發了水份使其形成雲層並下雨匯成河流,我們才能以水力發電。太陽也使大氣產生溫度的差異使其流動,所以它也是風力發電的原始動力。太陽更與月球合作,每天兩次把海水倒灌回河流的出口,使人類得以利用潮汐發電。

綜上所述,各種地球上可能發電的能源都有其缺點,而唯一不受此限制的則是使用地球以外的能源 - 太陽能。太陽內的氫氣受到重力壓縮每秒會融合六億公噸並釋放出高達  $3.85 \times 10^{23}$  Kw 的能量。這些能量乃以輻射的光線直接照到地球。在地球大氣外正射時所接收到的能量(Solar Constant)約為每平方米 1.37 Kw。太陽的表面溫度約 6000 ,其輻射為可見的光波(峰值約  $0.56 \mu\text{m}$ )。相形之下,人體的溫度只約 30 而放出的熱能為紅外線(峰

值約  $11 \mu\text{m}$ )。地球的一半雖可被陽光照到,但因太陽的斜射及雲層的阻隔,而且有海洋、山林等文明未及之區,所以可供使用的陽光只及雲層之上日照的一極小部份。即使如此,可用陽光的能量仍比目前人類的文明需求高約萬倍。太陽雖已閃耀約五十億年,但將再放出光芒五十億年,而人類的工業才開始數百年而已,所以太陽能可謂永不耗竭。而且其無所不在,是發電的最佳能源。

人體的輻射能量只有約 100 W,但目前工業化國家每個人使用的能量高達 1400 W 或相當於每年一萬兩仟度(KwH)的電力。太陽能比地球上所有的能源都豐富。地球表面可以收集的日照量若能全部轉變成電力一天可供全球人民使用三十年。不僅如此,以太陽能發電幾乎不會產生任何廢料,所以是最乾淨的能源。因此未來人類的物質文明必須建立在太陽能上,否則地球會被文明活動所產出的垃圾掩沒,到時人類不僅文明無以為繼,甚至生存都成問題。

### 光電效應

1633 年 R. Descartes 首先指出光是一種波動。1656 年 C. Huygens 以此說明光線會像水波般的撓射(Defraction)。波動需要介質來支撐(如水為浪的介質)。但太空中並沒有介質,那麼為什麼太陽及星光能照到地球讓我們看到呢?為了解釋星光的傳遞,有些科學家乃提出太空中充滿了一種看不見的光波媒介稱為「乙太」(Ether)。1704 年牛頓在暗室內觀察光線的反射路徑發現它乃沿直線行進,因此他認為光本身是粒子(Corpuscles),可以不需「乙太」為媒介而自行穿越天空。1803 年, T. Young 以實驗證實兩道光可以互相干涉

(Interference)因此他乃「蓋棺」論定光為波動。1839年 E. Bequerel 發現以光照射電解液時會使電極的電壓略增，顯示光線會產生電子。1905年愛因斯坦為了解釋「光電效應」(Photoelectric Effect)又將牛頓的理論「復辟」，認為電子乃被光波的粒子，即光子(Photon)，撞擊出來的。這個卓見使他在1921年贏得諾貝爾的物理獎(愛因斯坦的相對論雖然比光電理論重要得多，但他卻並未因此獲獎)。

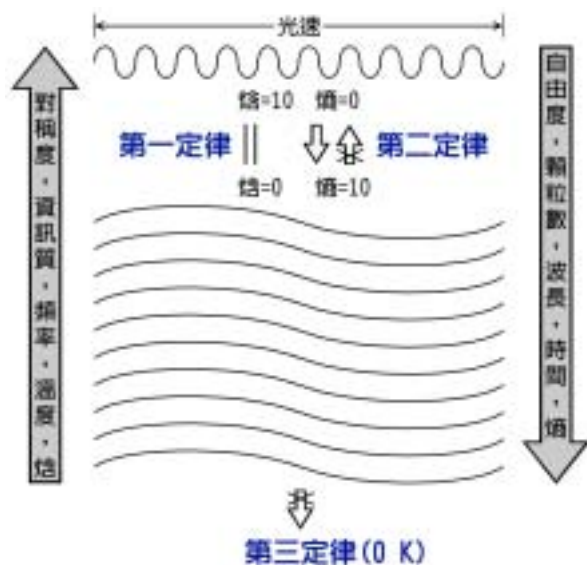
光波既然可以是粒子，那麼物質粒子是不是也可能是光波呢？1924年 L. De Broglie 提出物質波理論並用以描述電子的波動。1926年 E. Schrödinger 以此導出了原子的量子波理論，量子力學自此乃告確立。波動和粒子看似不能相容，但1927年 N. Bohr 以「互補原理」(Complimentarity Principle)指出它們其實乃一體之兩面。尤有進者，所有的基本粒子，不論物質或能量，都有波粒雙性(Wave-Particle Duality)。他因此驚嘆的說「偉大真理的反面亦為偉大的真理」。Bohr 的波粒說就是量子力學的多重宇宙論。波動代表同一時間不同空間的分佈，這意味著粒子的多重歷史。粒子則顯示同一空間在不同時間的軌跡，它呈現出我們眼前的選擇。因此波動及粒子實為同一「真象」(Reality)在兩個互相垂直截面上分別投影的痕跡。我們的「意識」乃局限在一個空間裏，因此只能看到波動或粒子而不能同時看到兩者。

光波和電子都是波動，也都是粒子。「光電效應」乃以光子撞擊電子使後者脫離原子而成為自由電子的現象。光子要把電子打出來必須要有足夠的能量。如果能量不足，以再多的光子來撞擊也無濟於事。以鎳的拋光鏡面為例，若以紫內線照射可以

激發出電子，但以可見光乃至紅外線照射，既使光源再強也打不出一個電子。這件事似乎很奇特，以「青蜓憾柱」為類比，如果一隻青蜓不能憾動一根柱子，但數萬個青蜓同時撞擊應該可以搖晃這根柱子才對！但事實卻非如此，為什麼呢？因為數萬隻青蜓的自由度太大，它們無法同時撞到柱子，所以力量不能集中。同樣的道理，能量不足的光子雖然數目很多，卻每個有各自的方向，因此不能像一個高頻的光子一樣把能量綁在一起，所以紅外線照射不出電子但紫內線卻可以。高能量光子的自由度低，低能量者則較高。自由度必須隨時間而增加，也就是說時間是不能倒流的。這就是「熱力學第二定律」的厲害之處。

以鈔票的使用也可說明「熱力學第二定律」，「光陰一去不複返」的走向。根據普蘭克定律  $E = h\nu$ 。因此能量只跟質(頻率)有關，它卻違反常識和量(振幅)無涉。以幣值為比喻，能量好像是單張(一個光子)的面值，而振幅卻似多張(多個光子)價值的總和。「熱力學第二定律」顯示一張千元鈔並不等於十張百元鈔。由於每張鈔票都是獨立的，因此各有其自由度。也就是說張數代表了「熵值」。雖然一張千元鈔的面值和十張百元鈔者相等(熱力學第一定律)，但因後者的「熵值」(張數)為前者的十倍，因此千元鈔可換取十張百元鈔，但十張百元鈔卻不能換回一張千元鈔(熱力學第二定律)。以千元鈔來買東西時(以高能的光線撞擊電子)會找回一些零頭(產生若干廢熱)。但這些零頭既使再累積也不能用來買同值的東西(紅外線照不出一粒電子)。然而這些零頭卻可以買更便宜的東西，這時找回的零頭會更小。當零頭的幣值降為一元(最低頻率)時就再也派不上用場，這就是所謂的「熱死」。

了。同樣的道理，溫度高的物體可以傳熱給溫度低者，但溫度低的物體卻不能傳熱給溫度高者，當溫度降為 0 K 時，頻率最低，只有相當於每秒一次，這時的波長為光速值，即  $3 \times 10^8$  米（這個距離約為地球直徑與太陽大小的平均數）。0 K 時的能量最低，即普蘭克能量 ( $h = 6.5 \times 10^{-16}$  eV)，這個能量約相當於  $10^{-48}$  克，比電子質量的  $10^{-28}$  克更低  $10^{20}$  倍，也就是說每個電子的能量足夠使它分化成  $10^{20}$  個 0 K 的粒子才會「熱死」。以上的熱力學觀念可以下圖表示：



圖三：熱力學定律的圖解示意。圖示集中的能量（焓或 H）可以分散（第一定律），但分散的能量（熵或 S）的卻不能集中（第二定律）。「焓值」為未來的時間，「熵值」為過去的時間。溫度則為焓變成熵的速率（斜率）（ $T = \frac{H}{S}$ ）。「熱力學第二定律」堅持要把焓轉為熵，也就是把未來的時間變成過去。當能量完全分散時，「焓」降為零而「熵」趨於最大。這時的溫度為 0 K。因為時間已經停擺，

所以不會再有任何變化，這就是宇宙「熱死」的狀況（第三定律）。

## 黑體輻射

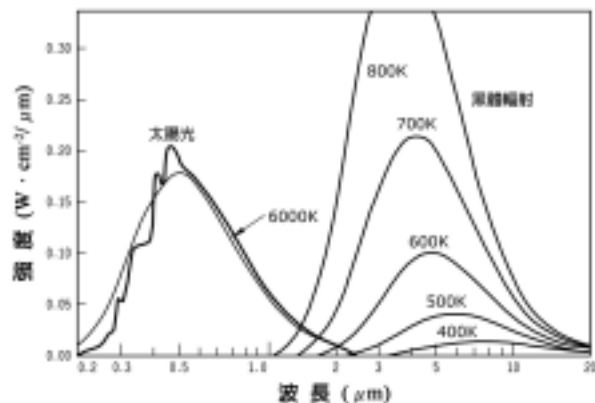
光波可以撞出電子。電子加速（如振動時）時也會發出光波。根據 Boltzmann 定律  $E = kT$ ，所以  $kT = h\nu$ ，即  $T = \frac{h}{k}\nu$ ；也就是說光波的頻率就代

表了它的溫度。光子的濃度（強度），即單位體積的粒子數與其撞擊距離（Collision Distance）或平均自由程（Mean Free Path）的立方成反比。撞擊距離就是光子的波長，所以光子的濃度與頻率的立方成正比，亦即與溫度的立方成正比。每一個光子的能量又和溫度成正比，這樣說來單位體積內光子的總能量會是溫度的四次方，以此為引申就可導出「黑體輻射」（Black Body Radiation）的能量公式  $\frac{E}{At} = \sigma T^4$ 。上式中的體積乃以時間內的面積（At）

表示，因此輻射的總能量密度指單位面積及單位時間而言。 $\sigma$  為 Stefan Boltzmann 常數，其值為  $5.67 \times 10^{-8} \text{ Wm}^2\text{K}^{-4}$ 。

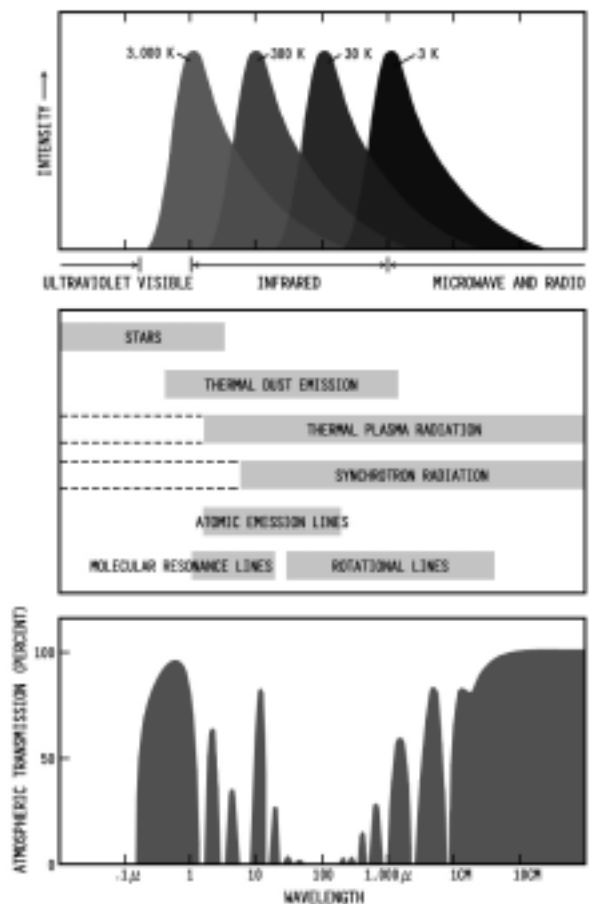
「黑體輻射」為物質在高溫時所能放射的最大能量，「黑體吸收」則為物質被光源照射時所能吸收的最大能量。「黑體輻射」的能量有其分佈，這個分佈就是 Planck 在 1900 年根據輻射量子所導出的公式： $E\lambda = C_1\lambda^{-5}(e^{-C_2/\lambda T}-1)^{-1}$ ，式中  $C_1 = 8\pi ch = 5.0 \times 10^{-24} \text{ Wm/s}$ ，而  $C_2 = hc/k = 0.014 \text{ mK}$ 。「黑體輻射」的強度有其尖峰值，其高頻部份因會分解成低頻（熱力學第二定律）所以會隨頻率的增高而減弱而其低頻部份則因波長太長難以吸收也會隨頻率的降低而減弱。其峰值的頻率則與溫度成正比有

如下圖所示：



圖四：「黑體輻射」的波形會隨溫度的升高而趨向高頻。圖中亦勾劃出太陽輻射光譜的位置。

根據上式，星體或星塵在不同溫度下所發出輻射波的形狀及其被地球大氣所吸收後的分佈狀態有如下圖所示。



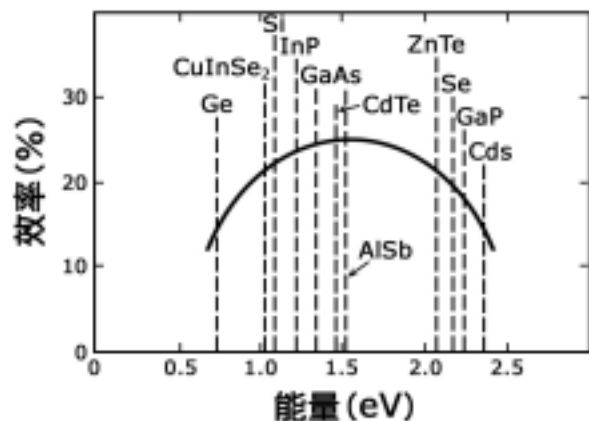
圖五：圖示「黑體輻射」與溫度的關係(上圖)；星體及星塵的輻射範圍(中圖)；以及太陽光透過大氣抵達地表的波形(下圖)。

## 矽晶太陽電池

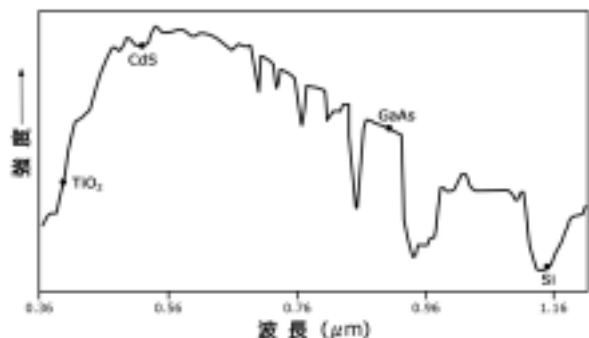
一般的太陽電池乃以半導體的正負接頭(P-N Junction)做為「光電效應」的電源。當光線透入這個接頭時會把半導體內染質(Dopant)的電子打出。這些電子會被接頭的接觸電場堆往N極再流向外接的金屬導線而產生電流。打出不同半導體內電子所需的能量不同，因此以陽光為能源來發電的效率也不一樣。一般而言，如果能階(Band Gap)太高，電子會被原子綁得太緊，這時只有少量的陽光具有足夠的能量可以將之打出，因此光能轉換成電能的效率就會偏低。反之，能階太低，高能光子的



能量會產生大量廢熱，所以光電效率也會偏低。這樣看來能階必須恰當，才能提高光線轉換成電子的效率有如下圖所示。



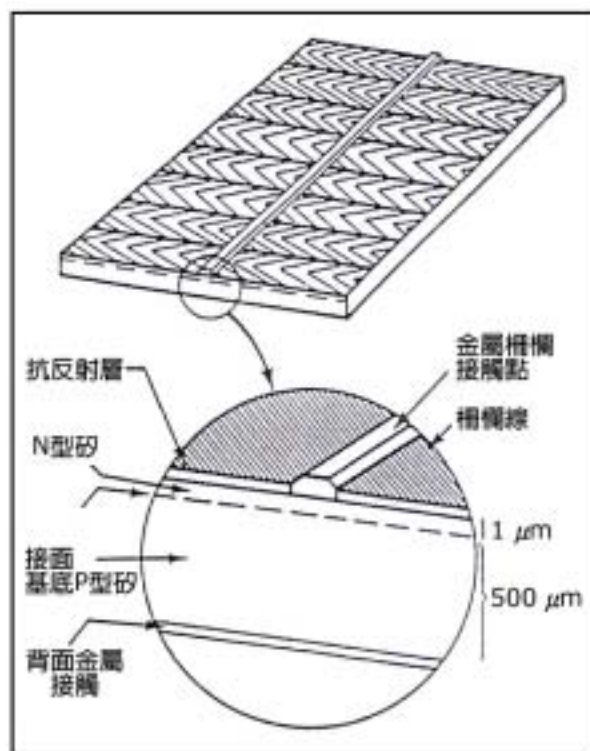
圖六：各種半導體把太陽光轉變成電能的最高效率。



圖七：半導體材料能吸收能量高於其能隙的光線，但差距越大時，吸收的效率越低。圖示不同半導體所製太陽電池其吸收太陽光的波長值。

目前最普及的太陽電池為矽半導體所製。矽半導體可為單晶、多晶或無晶。前者會反射光線但把吸收的光線轉換成電能的效率則較高；後者吸光較多（可達 40 倍），但「光電效率」卻偏低。無晶矽因可製成薄膜，所以價格比矽晶低很多。矽太陽電池的光電效率仍然不高，只有 10-15%。由於大部份的光能無法轉變成電能，發電的成本（約

\$0.5/KWH）仍遠高於傳統的電力（約\$0.1/KWH）。太陽能發電雖然無煙無臭卻因成本太高難以普及，只在特殊情況下才被少量使用，例如在電線未架設的偏僻地區太陽電池可為電話機的電源。

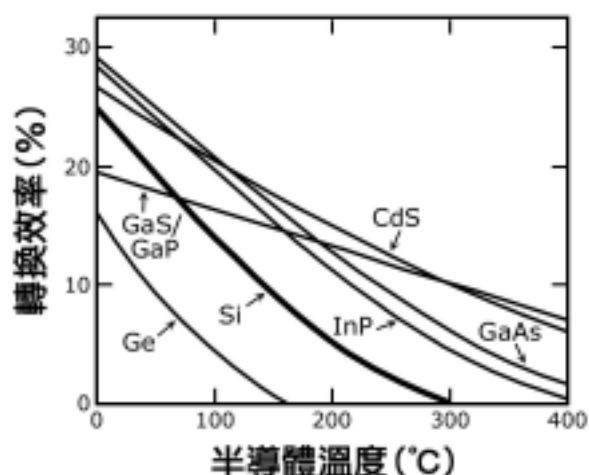


圖八：典型單晶矽太陽電池的構造。

目前的矽晶太陽電池雖已成商業產品，但它卻有下述難以克服的問題：

1. 光轉換成電的能量效率不及 15%，因此成本偏高。
2. 電池只能承受低於 100 的溫度，溫度再升高時，矽晶的導電性會大為提高，這時它會失去半導體的特性。除此之外，如果矽晶為無晶質薄膜，其結構也會受熱激蕩而被破壞。
3. 矽晶對輻射線的低抗力(Radiation Hardness)不高，因此太陽電池有老化的現象(多晶體者老

化更快)。若在太空中使用則其壽命不長，衛星上的矽晶太陽能板在使用 10 年後，其光電的能量效率通常會降低至只剩一半。



圖九：不同半導體所製太陽電池其光電效率受熱退化的趨勢。

以上的問題都可以鑽石太陽電池解決。不僅光電轉換效率可以大幅提昇至 50%，鑽石更可承受 500 以上的高溫而不虞損壞。鑽石又是最耐輻射線轟擊的材料，所以它在太空中使用時不會受到宇宙線的影響。除此之外，鑽石的硬度最高所以不易磨損，它的散熱也最快可以把熱能迅速的擴散。這些優越性質會使鑽石成為未來太陽電池的極品。

### 「熱力學第二定律」的迂迴

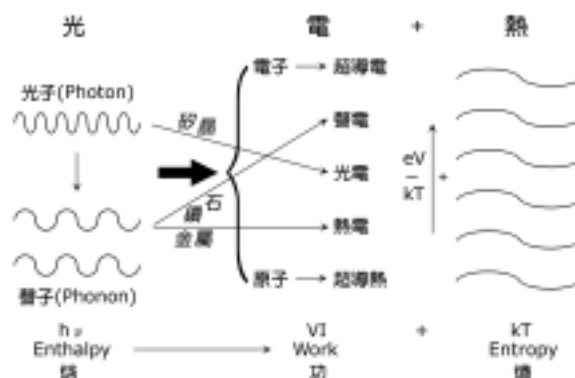
「熱力學第二定律」不能違反，但卻可在局部產生相反的變化。這情形就像是「江水向東流」一樣，雖然是「向東流」整體的趨勢，但在有些地方可以形成逆流的旋渦。為了在局部產生這些逆流卻必須在其他地方加速順流，這樣才能符合「熱力學第二定律」的原則。

熱力學「逆流」的現實例子包括以電能冷卻的

冰箱及能消化食物的生物。「熱力學第二定律」限定熱量(熵)只能由高溫處流向低溫處。冰箱的熱量卻能逆向而流。這個回流產生的原因是使用了外加的電能。這些電能生成時外部環境(如發電廠)的熵值已經大為增加(如燒煤)並遠超過冰箱熵值的降低。所以整體而言，熵值仍然會提高，這樣就符合「熱力學第二定律」的規範。

同樣的道理，生物的熵值會比外部的無生物低。為了維持這麼低的熵值，生物必須以消化食物來產生大量熵值(如排泄物)。因此生物的活動其實仍會使整體的熵值增加，因此「熱力學第二定律」在這種情況下仍然適用。

由於電能的熵值遠低於熱能，所以電可分散成熱，但熱卻不能聚合成電。為了使多量的熱組成少量的電，必須要讓更多的熱散佈成熵。根據這個原理，圖十顯示以不同能量的光和熱產生電的可能途徑。

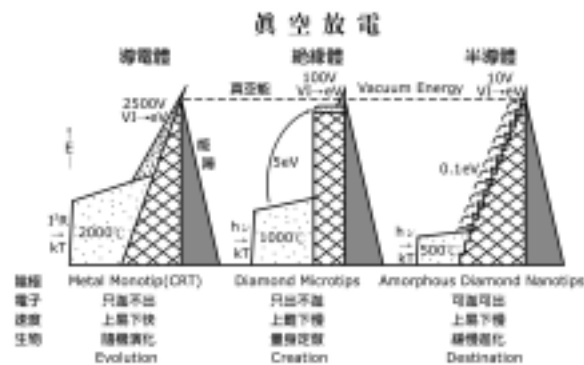


圖十：能量若集中在電子可形成超導電流。能量若集中在原子可產生超導熱流(聲流)。能量通常不能如此集中，所以會同時發出電和熱。以光子可直接打出電子(如矽太陽電池)。以熱能可以迫使電子在金屬內流動。以聲子可推動鑽石內的電子使其沿缺陷移動而形成電流。

「熱力學第二定律」雖然不讓低能量的熱產生



高能量的電,但部份的熱可以將電子逐漸推向較高的能量再以真空放電的方法匯聚成電流。圖十一顯示以這種爬樓梯式的槓杆原理來發電的方法。



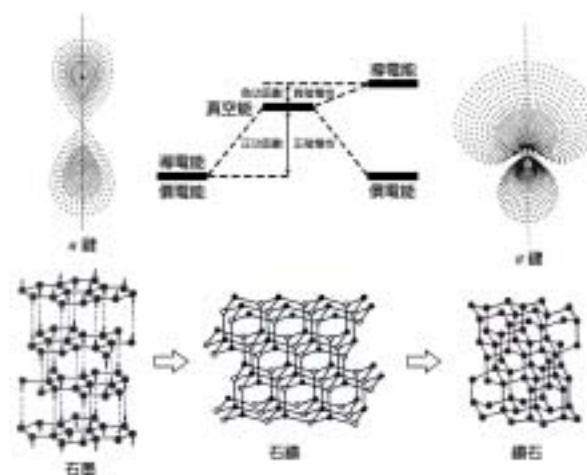
圖十一：金屬(如鎢)內能帶為連續的，所以電子不能佔據較高的能階而必須在高溫時以很大的電場才能在真空中放出電子。絕緣體(如鑽石)的能隙(Band Gap)很大，但電子若佔據導電帶時卻可順利在真空中射出電子。具有大量缺陷的無晶鑽石可形成像階梯式的缺陷能帶，電子即可在熱能激動下逐漸爬到導電帶而在真空中射出。

## 鑽石太陽電池

鑽石太陽電池有兩類。第一類是把鑽石像矽晶一樣製成 PN 接頭。這種半導體稱為二極體(Diode)，而其「光電效應」所激發出的電子為突發式的(Avalanche)。鑽石半導體也有單晶、多晶或無晶三種。這些鑽石半導體必須注入適當的染質，所以它們的生產成本偏高，因此並不實用。第二類是不把鑽石半導體串聯成太陽電池，反而把鑽石小尖錐並聯成「電子槍陣」。這些像「避雷針」狀的「鑽石電子槍」可藉尖頂集中電場而把電子藉「量子穿隧」(Quantum Tunneling)的效應射出，稱為「場發射」(Field Emission)。

鑽石之能發射電子是它常具有負陰電性

(Negative Electron Affinity)的緣故。陰電性指導電帶(Conduction Band)的最低能階比真空者為低，所以電子會被原子吸附。陰電性的相反即為原子射出電子的活化能(Activation Energy)或功函數(Work Function)。一般的金屬其功函數為正值，所以電子在真空中發射不出，這時必須加熱至高溫才能射出電子。這種電子槍稱為熱陰極(Thermionic Cathode)。熱陰極是真空管或陰極射線管(Cathode Ray Tube，即 CRT)所用的電子槍。鑽石的表面若吸附氫原子會具有負的功函數，所以它導電帶的最低能階比真空者還高。電子如果來到鑽石的尖頂會被原子排斥射出。因為有這個特性，鑽石在甚低的電場誘導下可以不需加熱即可射出電子，故它乃被稱為冷陰極。

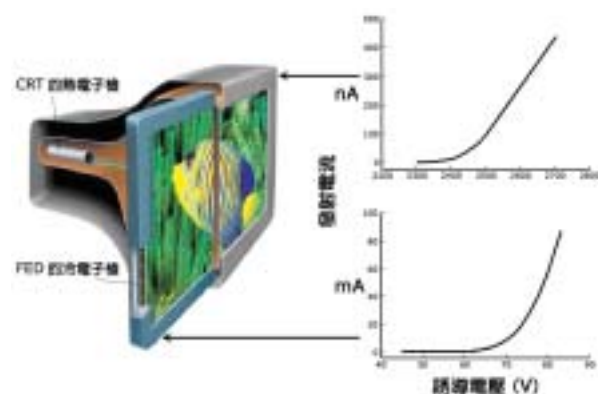


圖十二：把導電的石墨(左圖)壓成絕緣的鑽石(右圖)時，其導電帶的能量會升高甚至超至過真空能量。若電子能爬到導電帶就可不費「吹灰之力」飛進真空而飄向陽極。圖下顯示石墨如何轉化成鑽石。圖上為表面原子其晃動鍵(Dangling Bond)電子雲的分佈及其能階與真空能的相對關係。

鑽石的表面常吸附著氫或氮，這時它就會排斥

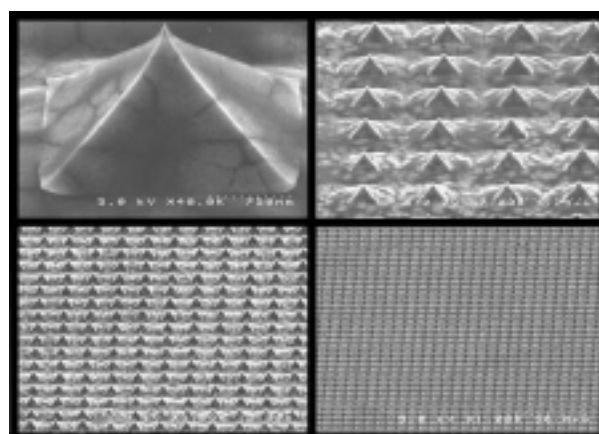
電子，這就是為什麼鑽石常會有疏水性 (Hydrophobic)。鑽石本身是絕緣體，因此不能導電，但如果含有染質(如 B)就會成為半導體，這時若在其上加一個負偏壓，少量電流即可通過。當電子跑到鑽石表面，就會受其排斥，這時電子會隔真空跳到陽極上。半導體的鑽石可在微弱的電場 ( $1 \text{ V}/\mu\text{m}$ ) 下自動射出電子，因此可成為理想的電子槍。一般的電子槍乃為金屬(如 W 或 Mo)製成，但金屬有很強的陰電性，會吸附電子，因此必須加熱至高溫(如 2000 )，這樣才能使原子高速振蕩而把電子甩出。既使如此，在真空中發射電子仍需外加相當大的電場(如  $1000 \text{ V}/\mu\text{m}$ )。

CRT 早已大量用於電視及其他高品質顯像器，然而由於 CRT 過於厚重，已被平面顯示器 (Front Panel Display 或 FPD) 逐漸取代。平面顯示器目前以液晶顯示器 (Liquid Crystal Display 或 LCD) 為主，但 LCD 只把白光(如鹵素燈)反射顯影，它的光線經多重吸收後(濾鏡、偏光鏡、液晶)強度只剩約 1%。LCD 因此耗電甚大，而且影像不亮，在陽光下看不清楚，除此之外，LCD 因為液晶旋轉不快，急速的影像變化會來不及顯示。



圖十三：CRT 與 FED 的面版厚度與其發射電流的強烈對比。

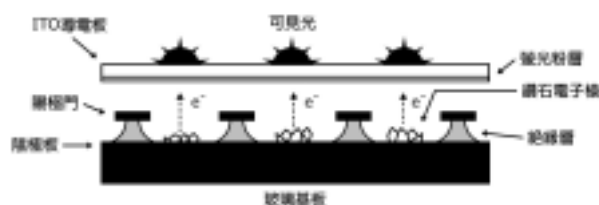
平面顯示器的最佳設計乃使用鑽石冷陰極來發射電子，冷陰極可製成電子槍陣稱為「場發射陣」 (Field Emission Array 或 FEA)，陣內的每隻槍可製成尖錐狀以強化電場使電子更容易從頂點射出。這種電子槍可以多種方法製成，例如把矽晶蝕刻成密集的小孔(約  $1 \mu\text{m}$  大)後就可以用化學氣相沈積 (Chemical Vapor Deposition 或 CVD) 的方法在其內長出如火山狀的鑽石錐。CVD 製造時乃把含碳的氣體在氫氣中分解，分解的碳會維持鑽石鍵 ( $\text{sp}^3$ ) 而沈積在基材上，如果在氣氛中加入染質(如  $\text{BH}_3$ )，就可製成半導體的 FEA。



圖十四：以 CVD 製成的「鑽石電子槍陣」每平方公分可含千萬個微米級的「避電針」。

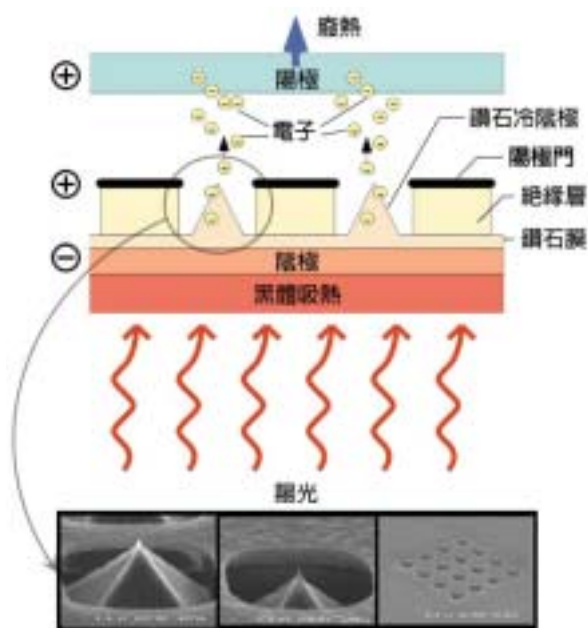
在 FEA 的前面擺好螢光板後就可形成鑽石 FEA 的顯示器 (Diamond Field Emission Display 或 DFED)，這種顯示器有諸多優點，包括色彩亮麗、反應即時、視野寬廣、真空不高、用電極省、不易損壞等。除此之外，DFED 的構造比 LCD 簡單得多，所以在量產後的成本也會遠低於 LCD。DFED 是未來理想的大面積看板(如用於家庭電影院的壁掛式銀幕)，鑽石平面顯示器的雛形已經問世(如

Motorola 所製)，由於它設計有先天的優越性，因此它將來應可取代 LCD 成為平面顯像器的主流。



圖十五：鑽石場發射平面顯示器的示意。

鑽石既然能製成 FEA 來顯示影像，它所產出的電子也可匯集成為電流。2001 年美國 Vanderbilt 大學的 Timothy Fisher 即將 DFED 改裝成太陽電池，它的設計有如下圖所示。



圖十六：鑽石太陽電池的示意。陽光以吸熱材料收集成為熱能並經金屬陰極而傳達鑽石的尖錐。這時熱能可以把鑽石內染質的電子逼出並在陽極門起動電壓的誘導下隔真空射向金屬陽極，電子形成迴路後即成太陽電池。

鑽石太陽電池的特色乃把鑽石冷陰極改為鑽石熱陰極，使原子振蕩甩出的電子數目大幅增加。陽光經聚焦後可能會把鑽石加熱至 1000 。鑽石散熱乃以原子振動的聲子 (Phonon) 傳佈，所以會比金屬內的電子流動更快捷。除此之外，鑽石的比熱奇小，不像一般熱沈材料 (如銅) 那樣會積蓄熱能。由於熱量在鑽石內可以毫無保留的傳遞，所以整片鑽石幾乎沒有溫度梯度 (Temperature Gradient)，也因此它尖頂的溫度也接近 1000 。這時鑽石半導體的能隙會受熱降低，電子也會因熱的激蕩從價電帶 (Valence Band) 彈跳至導電帶 (Conduction Band)。尤有進者，鑽石尖錐的「避雷針」效應會因針尖位置的不確定性而提高，這種「量子效應」會加速電子的產出使射向金屬陽極的電流加大。

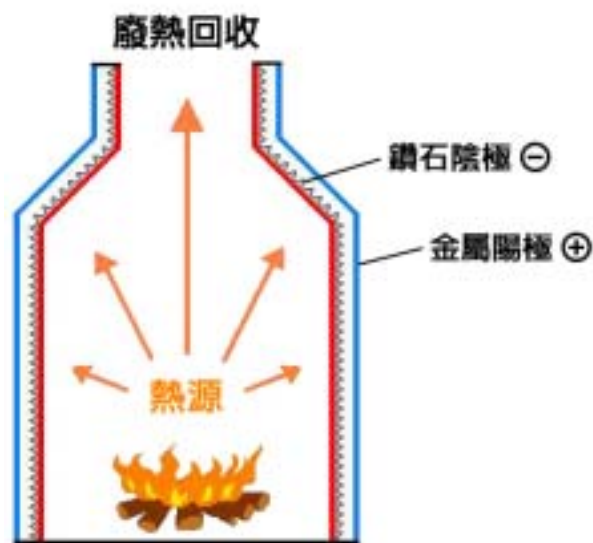
鑽石太陽電池與目前的矽晶太陽電池最大的差異為前者使用「熱電效應」(Thermal Voltaic Effect) 而後者為「光電效應」(Photo Electric Effect)。換言之，鑽石太陽電池像是早期的真空管 (Vacuum Tube)，而矽晶太陽電池則有若現代的電晶體 (Transistor)。1960 年代的真空管因使用熱陰極的金屬電子槍所以效率不彰。後來電晶體才有機會將它取代。但「借屍還魂」的「鑽石電子槍」卻非「吳下阿蒙」。鑽石的負陰電性已排除金屬電子發射太慢的瓶頸。真空放電比固體導電快得多。而且因為沒有電阻所以電流可以大幅加大。同樣的道理，電流密度也不會像金屬導電一樣會因溫度的提高而降低。除此之外，真空管還可以承受高能輻射而不致損壞。因此鑽石真空管在下述功能元件中會比最好的電晶體更優越：超高速開關 (Ultra Fast Switch)、雷射定位儀 (Ring Laser

Gyroscope)、電流擴大器(Current Amplifier)、微波發射器(Microwave Emitter)、高能粒子源(Intense Particle Source)、電子蝕刻源(E-Beam Lithography)、電子顯微鏡(Electron Microscope)、電子激蕩器(E-Excitation Device)。鑽石真空管極可能在將來會逐漸光復被矽晶佔領的失土,甚至包括製成電腦的中央處理器(CPU)。

鑽石太陽電池靠「熱電效應」可使用較低的太陽熱量,所以其發電的效率較矽晶太陽電池的「光電效應」為高。尤有進者,「鑽石電子槍」也提供一個在真空中沒有電阻的通路,因此電子流動會比矽半導體者暢通,也就是說,「鑽石電子槍」所產生的廢熱(熵)較小,這是它由光生電其能量效率可以提高的另一原因。

雖然電子隔真空飛向陽極的過程毫無阻力,但電子撞擊陽極時其動能會轉換成熱能,因此容易燒毀陽極的表面,尤以陽極的突出處為然。所以陽極表面要儘量平滑以避免電流過度集中,此外以耐溫金屬(如鎢或鉬)鍍在銅極的表層也可以大幅延長陽極的壽命。

Fisher 樂觀的認為鑽石太陽電池如果大量生產,其價格會降低到約\$1/cm<sup>2</sup>,這樣它就可有效的和矽晶太陽電池競爭了。Fisher 更引申出以鑽石FEA取代渦輪機而製成靜態發電機的觀念,裝設這種發電機可以使用化石燃料為熱源,這樣就可以取代建價昂貴的火力發電廠。由於鑽石發電機沒有移動的滑輪機,所以它不僅保養容易,也減少了廢熱的產生。



圖十七：火力發電時以「鑽石電子槍」做為靜態發電機的示意。

#### 「無晶鑽石」太陽電池

上述的鑽石太陽電池其實有許多缺點。首先,太陽光要把鑽石加熱至 1000 並不容易,其次,發出的電壓極低,必須將直流電改為交流電,再以變壓器加大電壓,這樣在導線上傳送時電流的廢熱損失( $I^2R$ ) 才會減少,在變壓時電能會不可避免的損耗約 10%。

但 Fisher 設計的鑽石太陽電池最大的致命傷是鑽石半導體的能隙仍大,因此需要以一附加的柵極或陽極門(Gate Anode)將電流吸出,其結果是以電池補貼能量來發電。因此「熱電效應」的效率會大打折扣。更有甚者,陽極門必須和鑽石絕緣以免輸入的電流造成短路。但在 1000 的高溫下,連純鑽石都可能成為導體,因此如何把陽極門絕緣乃成一棘手的問題。

除此之外,「鑽石電子槍」若仍以染質為電子的來源會碰到矽晶電池同樣的問題,即熱能必須接



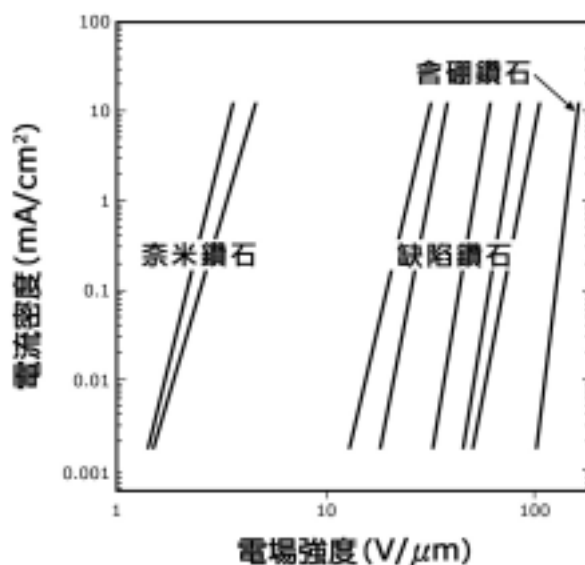
近染質的能階才能產出電子，這樣會使大部份的熱能無法使用，所以鑽石太陽電法的「熱電效率」畢竟有限。

為了解決這些問題，必須改用更容易發射電子的電子槍。一個好的電子槍必須符合兩個要件，即電子要能流通，所以電阻要小；而且電子要能發射，所以活化能(功函數)要低。純鑽石為絕緣體，雖然可以發射電子，卻沒有電子可以發射，因此不能成為電子槍。純石墨是導體，雖然電子通過不難，但「子彈」卻被卡住(功函數太高)，所以也射不出電子。理想的電子槍必須介於這兩者之間，表一比較了以不同含碳材質當電子槍時其發射電子的難易程度。

表一：達到  $10 \mu\text{A}/\text{cm}^2$  所需的驅動電場(Turn-on Electric Field)

含碳材質	驅動電場(V/ $\mu\text{m}$ )
奈米碳管(SWNTs 及 MWNTs)	1-5
奈米鑽石(Nanodiamond)	2-5
無晶鑽石	3-7
奈米碳纖維	6-10
未成形的 CVD 鑽石	10-20
SiCN 奈米柱	10-20
含硼鑽石	> 20

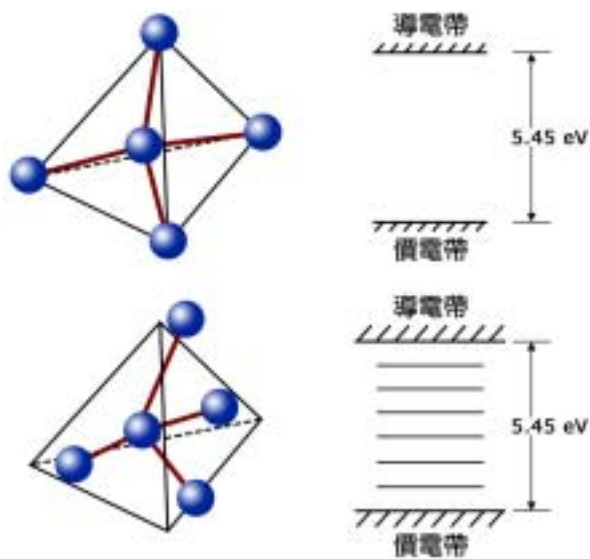
以不同的鑽石材質做為場發射的 FEA 時，其發射電子的難易程度也可以下圖顯示：



圖十八：不同鑽石材質發射電子能力的比較。

為了增加「熱電效果」，鑽石內必須有極多高低不等的能隙，這樣才能充分利用具有不同能量的熱源。但鑽石能用的染質數目只有數種(如 B、P、Li、N)，因此充其量只能在半導體內插入幾種能階，這樣效果並不顯著。此外在鑽石內加入染質時製程會很複雜成本就會偏高，所以不切實際。更好的方法是以碳本身為染質製成「無晶鑽石」(Amorphous Diamond)，以這種「物理染質」來調節能隙比使用「化學染質」更容易，所以吸收熱能的範圍會大幅加大。

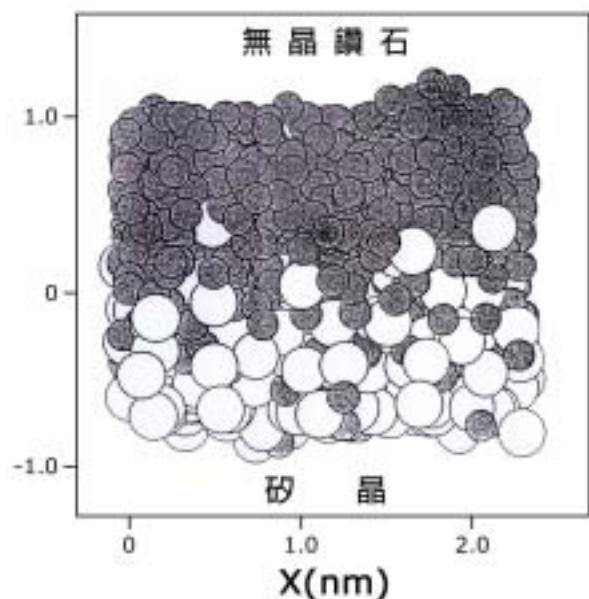
「無晶鑽石」為以扭曲的鑽石鍵為組織的類鑽石(Diamond-Like Carbon 或 DLC)。鑽石的碳鍵( $\text{sp}^3$ )是單鍵，稱為直接鍵( $\sigma$  Bond)，直接鍵的能隙很高(5.45 eV)。石墨的碳鍵( $\text{sp}^2$ )近似雙鍵，包括直接鍵及間接的金屬鍵( $\pi$  Bond)。石墨內金屬鍵的導電帶與價電帶接觸，因此沒有能隙。「無晶鑽石」的碳鍵長短不一，鍵的貢獻度可多可少，因此其能隙也有高有低，而範圍更可廣及 0.2-4.1 eV。



圖十九：碳的正四面體(Tetrahedral)鍵結( $sp^3$ )因不含金屬鍵(Metallic Bond)其能隙甚高，電子無法從價電帶跳到導電帶，所以鑽石是絕緣體(上圖)。碳的扭曲(Distorted)四面體鍵結含少許不等量的鍵，這時能隙有高有低。電子就可從價電帶慢慢爬到導電帶。「無晶鑽石」可視之為具有極多「物理染質」的半導體。這些染質會形成有如樓梯的「缺陷能帶」(Defects Band)，電子就可從價電帶慢慢爬到導電帶。

當「無晶鑽石」形成冷陰極時，由於電子可像爬樓梯似的由一個能隙跳到另一個能隙，所以可以輕易的衝至表面，再藉鑽石的負陰電性射向陽極。因此「無晶鑽石」比「半導鑽石」發射電子的速率會快得多。

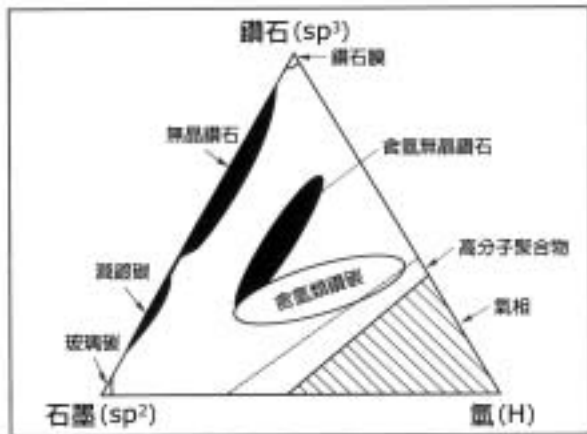
「無晶鑽石」還可以「陰極電弧」(Cathodic Arc)塗佈，這種方法有如噴漆作業，十分簡單，而且可以鍍在甚大的面積上(如  $1\text{ m}^2$ )。以「無晶鑽石」製成太陽能板不需半導體的 P-N 接頭，因此未來其製造成本(約  $\$0.1/\text{cm}^2$ )甚至會比矽晶太陽能薄膜更為低廉。



圖二十：「無晶鑽石」裏的碳原子有如亂石堆積，因此其鍵長不一而使能隙的範圍加寬。

「無晶鑽石」不含氫，因此與一般的類鑽碳(Diamond-Like Carbon 或 DLC)的性質不同。含氫的 DLC 容易吸附水氣或氧氣，這時真空放電的功函數會逐漸增加，電子就越來越難射出，所以含氫 DLC 的性質較不穩定，「無晶鑽石」則沒有這種性能會逐漸減退的老化(Aging)問題。「無晶鑽石」的含氫量要小，但適度的滲入氮原子卻可以提高電子濃度(氮比碳多一個電子)，因此有助於提昇射出的電子流量。除此之外在真空中滲入少量的正離子(如電子解離能甚低的  $\text{Rb}^+$ 、 $\text{Cs}^+$ 等)則可以避免電子彼此的排斥力，因此可以靠吸引電子來加大噴出的電流密度。



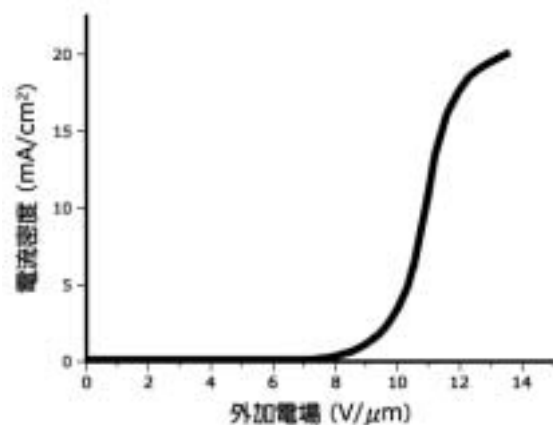
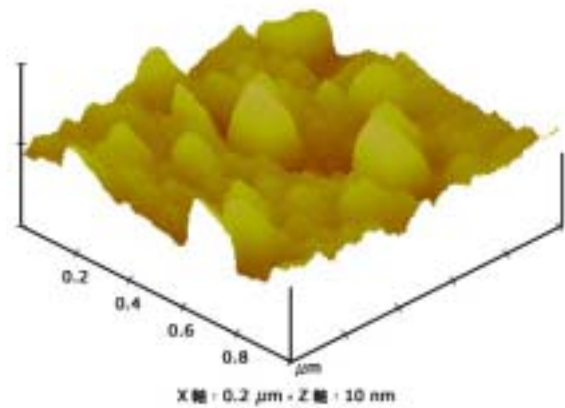
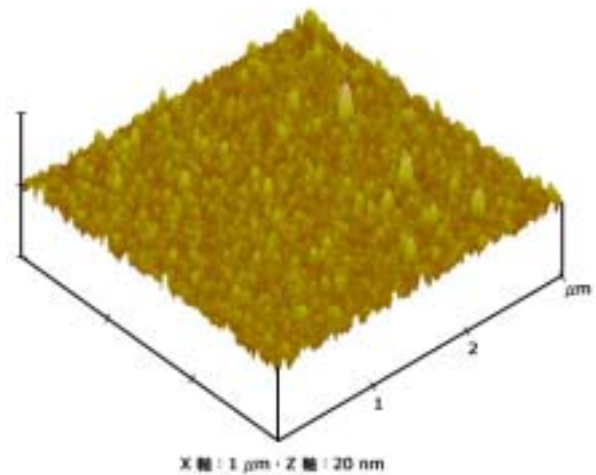


圖二十一：含碳材質的種類。圖示類鑽碳為鑽石、石墨及聚合物(Polymer)的複合材料。

「無晶鑽石」的鑽石鍵結( $sp^3$ )比率( $>80\%$ )遠高於含氫的 DLC。這樣負陰電性會增強，尖端放電就更加順暢。除此之外，「無晶鑽石」的硬度接近鑽石，比一般的 DLC 高約二倍，所以也沒有磨損消耗的問題。更重要的是「無晶鑽石」的散熱速率比含氫的 DLC 高很多，所以它的聲子能量較高，激發出的電子數目也會更多，也就是說「無晶鑽石」的「熱電效果」會好很多。

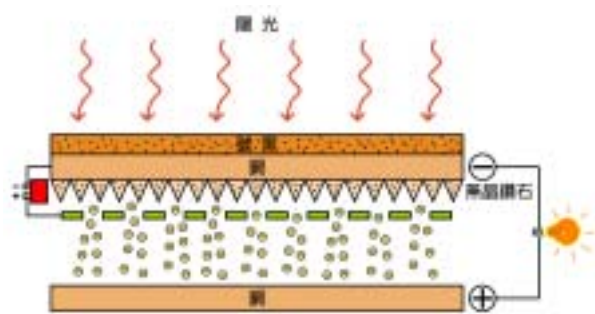
除此之外，以「陰極電弧」塗佈「無晶鑽石」時，其表面的粗糙度(Asperity)可以製程參數控制。DLC 的一般應用乃做為刀具(如車刀、鑽頭)、模具(如光碟或封裝用)或功能元件(如硬碟 磁頭)的護膜，所以表面要越平滑越好，這樣才能降低摩擦阻力，但做為場發射器表面反而要更粗糙才能加強「避電針」式的放電效果。以「陰極電弧」噴塗「無晶鑽石」時只要提高電弧的電流就可輕易的調整「無晶鑽石」表面的粗糙度乃至放電針尖的密度及高度。這些電子槍的尺度甚至可達奈米級，其數量可多達每平方米數十億個，因此其電子的射出量

會遠高於以上述微米級鑽石所製的 FEA。



圖二十二：「無晶鑽石」的粗糙表面會自然形成密集的奈米電子槍陣，在微電場下可以放出大量電流(甘明吉提供)。由於「無晶鑽石」的功函數甚低，以太陽光也可激發出電子流，因此它是理想的太陽電池材料。

使用「無晶鑽石」膜吸收陽光時，由於放電更為容易，不僅熱電效果會大為增高，放電的溫度也可大幅降低至 300 -500 。因此「無晶鑽石」的放電可以使用多種熱源，除太陽光外，「無晶鑽石」膜也可成為火力或核能發電的「發電機」。尤有進者，由於「熱電效應」良好，太陽電池也可能不需以輔助柵極來吸出電子。如果仍要加入柵極時只要架設一層金屬網就可以了，這樣就不必使用隔離的絕緣層，也可以節省製作的成本。



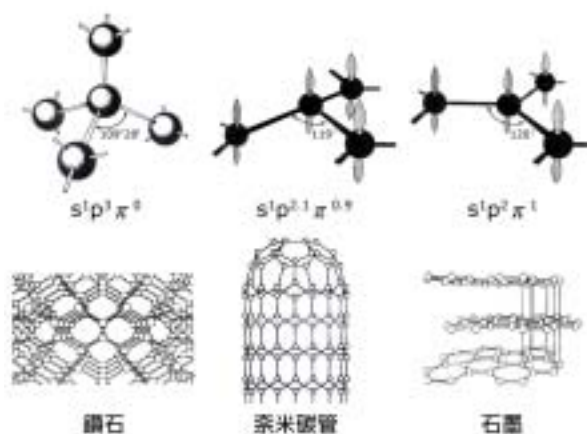
圖二十三：以「無晶鑽石」膜製成太陽電池的示意圖。

#### 奈米碳管太陽電池

除了「無晶鑽石」外，另一可能更好的發電 FEA 乃使用「奈米碳管」(Carbon Nanotube 或 CNT)。CNT 其實是捲成筒狀的石墨，在捲曲處，碳原子的鍵結已經部份成為  $sp^3$ ，具有若干鑽石的特性，因此發射電子的功函數也會降低。尤有進者，CNT 的表面典率甚高(即前端極為尖銳)，所以可以強力集中電場而放出特大的電流。

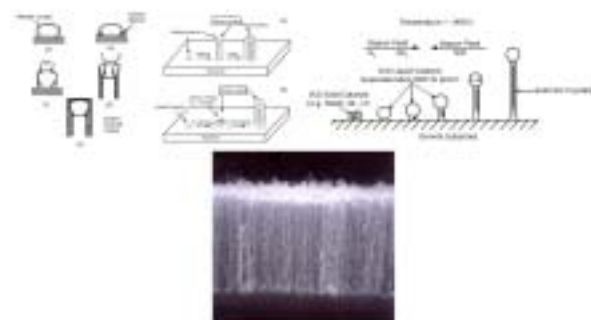
CNT 可為單層(Single Wall)或多層(Multiple Walls)，前者的直徑為 13.53Å；而後者可達 10-20  $\mu m$ ，但不論是單層或多層的 CNT 其管壁都很薄，所以不能承受太大的電流，否則會有燒毀之虞。然而

電流通過 CNT 的「電子槍陣」時常會集中在某些 CNT 的纖維，這些纖維就容易因過熱而燒斷，所以必須使用密集的「電子槍陣」才能降低每根 CNT 管壁的電流密度，但既使如此，電流分佈仍然不能均勻，CNT 的纖維乃被逐根燒斷，因此以 CNT 製作的「電子槍陣」有隨時間而劣化的趨勢。此外 CNT 內的電子流動並非持續不變，而乃為間歇性的放出，因此用來顯示光源亮點會明暗互見。CNT 另一問題為其在電場下會因靜電排斥而彼此推擠，因此在電場的開關之間每根 CNT 都可能會移動，使得其放電效果難以重複，加上部份 CNT 的管路會因電流的過份集中而燒毀，所以 CNT 的發電效果會因老化而減弱。除此之外，CNT 因製程溫度較高( $> 700$ )，所以也不能長在玻璃基板上(如用來導電的 ITO)，因此 CNT 的應用乃受限制。與此相較，「無晶鑽石」的穩定性較高，而且因製程溫度甚低(150)，可以鍍在玻璃基材上，所以用途反而更為寬廣。



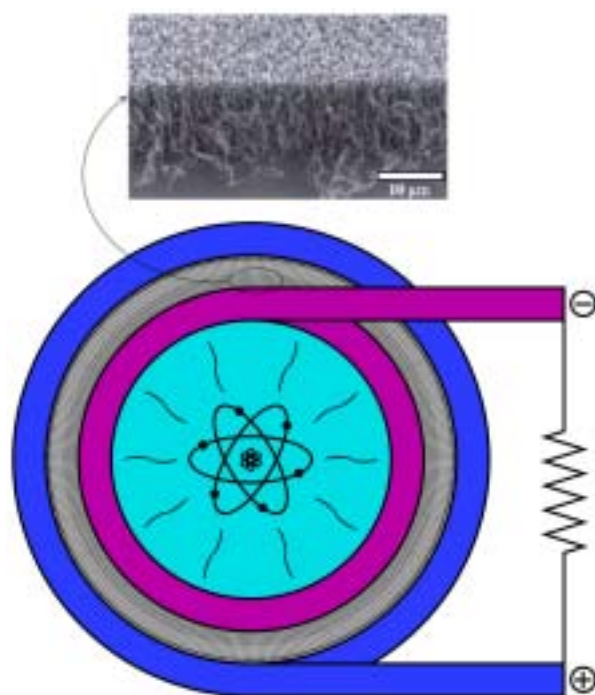
圖二十四：奈米碳管的原子構造。當  $sp^2$  鍵向內彎折時會壓縮電子，把它逼出外圍，這時電子比較容易脫落，因此可以熱能振蕩碳原子將電子甩出而射向陽極。

CNT 可在金屬基材上大量沈積，首先可以高溫爐將含碳的氣體(如甲烷)分解使碳沈積在一金屬催化劑(如 Fe、Co、Ni 及其合金)的薄膜上，金屬催化劑熔融時會分離成點狀，每個金屬點可將分解的碳石墨化並即捲成一個 CNT(常為多層)。這些 CNT 會向垂直於基板的方向延伸，並整齊的排列有如地毯一般。CNT 的管體粗細及密集程度可以催化劑的厚薄來控制，越薄的催化劑會熔成越小的點，因此就會生出越細的 CNT，而且其數量會更為密集。CNT 的長度則可以生長的時間來調節。



圖二十五：以熔融的金屬催化自氣體沈積出的 Si(左上)、C(中上)及 SiC(右上)並長成針狀的示意。下圖顯示以相似的氣液固(VLS)法沈積出奈米碳管的橫截面圖。

目前大量製造 CNT 的技術已漸成熟而且成本變得較為合理。CNT 已被用來做平面顯示器(如 Motorola)，但因每一個發射點的放電必須獨立控制(如以薄膜電晶體, Thin Film Transistor 或 TFT 控制)，而且必需以螢光板發光，因此技術相當複雜，使得成本也相對增高。CNT 更簡單的應用即做為太陽能電池的電子槍，這種靜態發電裝置也可取代傳統的動態發電廠或核子反應爐，這樣不僅可能提高熱電效率，也可降低發電廠發生意外的風險。



圖二十六：以「奈米碳管」做為核能電廠「靜態發電機」的構思。

#### 靜態的發電廠

綜上所述，以「無晶鑽石」或「奈米碳管」當做電子槍來發電可突破目前各種發電方法的限制(成本及風險)。一般來說，熱能的能量太低，所以不足以釋出足夠的電子來形成發電所需的電流，例如將金屬一端加熱，的確可以迫使少數電子流向較冷的另端，這就是為什麼我們冬天手摸到鐵會感覺到冷的緣故，「熱電偶」(Thermo-Couple)可以用來測量溫度的原理。但這種「熱電效應」所產生的電流極為微弱，更有甚者，當電子流經金屬本身時會碰到電阻，所以大部份的能量會形成不能使用的廢熱(熵)。以「鑽石電子槍」發射電子不僅可以產生較大電流而且可以解決電阻問題，因此可以有效的

用它來發電。

以低能量的熱來激發出高能量的電子是不是違反了上述「放之四海而皆準」的「熱力學第二定律」呢？答案卻是未必。原因是電子在「光電效應」時乃被一次踢出，因此需以極高能量的光子來撞擊。而以「鑽石電子槍」激發電子時，電子乃被逐漸的推出去，所以可以較低能量的「聲子」來完成。這其實就是一個以時間換取空間的槓桿原理，「光電效應」像是要翻越一道高牆，所以困難重重，但「熱電效應」卻如爬樓梯一樣，雖然它較費時，但卻省了不少力氣，這就是為什麼利用太陽熱來發電其效率可以比太陽光要高很多的原因。

以鑽石或 CNT 電子槍發電其實用到了相當多重物理特性，有如下述：

1. 太陽光(電子振動產生的電磁波)
2. 黑體吸熱及輻射(光的散射)
3. 金屬陰極(電子由黑體處的熱端流向鑽石處的冷端)
4. 鑽石聲子(電子的撞擊使鑽石晶格振動產生聲子)
5. 電子流出(聲子把鑽石的電子由價電帶逐漸滾到導電帶)
6. 電場發射(電子因鑽石表面的排斥而射向陽極金屬)
7. 電流迴路(電子由陽極流回陰極)

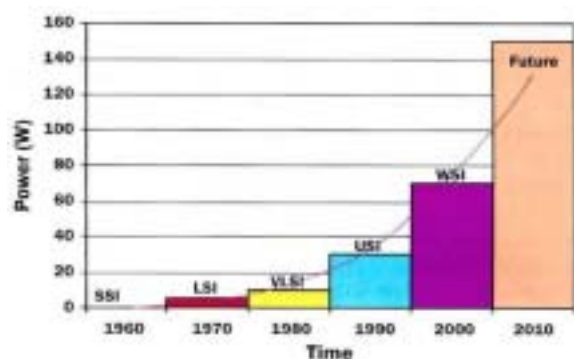
鑽石原子的電子經過光 熱 聲 電的互動而被逼出，其空洞乃由金屬電子流入補充，就這樣完成了以熱發電的迴路。以廢熱來發電會比用垃圾來發電更為實用，看似沒用的陽光可以鑽石發電真可謂是化腐朽(熱)為神奇(電)了。

以鑽石或 CNT 電子槍將熱轉換成電是發電觀

念(Paradigm)的一大突破。一般的發電廠一定要用到移動的設備(如渦輪機)才能發電，但以電子槍發電卻沒有移動的部份，這種靜態的發電廠不僅造價便宜，而且維護容易，更減少了環境的污染。除此之外，這種發電技術可以細微化，因此可成為微小機電(Micro Electro Machine 或 MEM)的動力來源。鑽石發電機可比一般的電池體積更小，其供電的時程也能持久。鑽石太陽電池及鑽石「熱發電機」為科技的一大奇蹟，它的實現可能徹底解決能源取得的瓶頸，未來甚至也許會使電比水還便宜。果真如此，人類文明的發展可以首次不受能源的限制而可以全速挺進。

#### 場發射散熱片

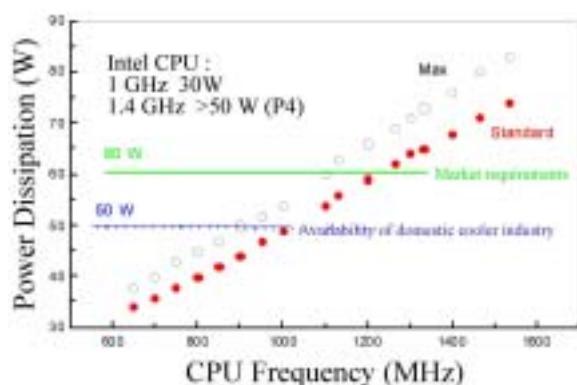
1965 年 Intel 的 Gordon Moore 曾預測 CPU 的電晶體數目會每年(後修正為每 18 個月)增加一倍，半導體科技在過去三十餘年的確遵循了這個 Moore's Law。現在的 CPU 上的電晶體數目已經高達一億個之多。由於線路日益趨密集，功率迅速增加，現在已達 100W(見圖二十七)。



圖二十七：半導體晶片功率提高的趨勢圖(Kaveh Azar, Lucent Technologies & J. Morabito, Lucent Technologies, Electronics Cooling, December 2000, Vol.6, No.4)。

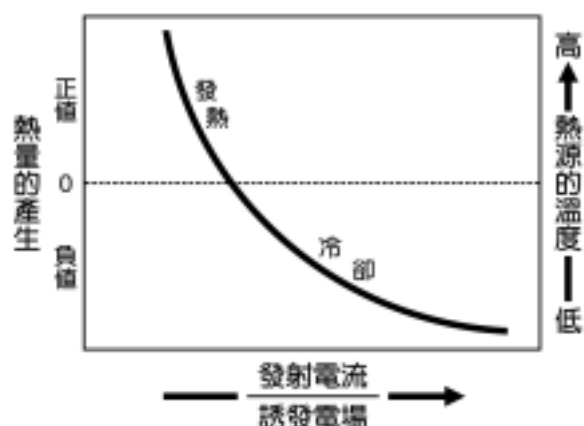


現在晶片的線寬已經迫近  $0.1\ \mu\text{m}$ ，未來繼續變得更細時，將碰到散熱不及的瓶頸(見圖二十八)，因此如何使廢熱在微小的晶片內迅速汲出乃成未來「摩爾定律」成敗的考驗。根據 1997 年 National Technology Roadmap 的預測，當半導體的線寬降到  $0.1\ \mu\text{m}$  以下時，IC 的功率會超過 100 W。由於能量過於集中，晶片的局部溫度會急劇升高。當溫度到達  $60^\circ\text{C}$  以上時，晶片內膨脹的金屬會把介電層撐裂而使晶片損壞。更有甚者，當溫度接近  $100^\circ\text{C}$ ，半導體的導電性大增，晶片就根本不能使用。為了要避免矽晶因過熱而燒壞，散熱的速率必須超過  $30\ \text{W}/\text{cm}^2$ 。



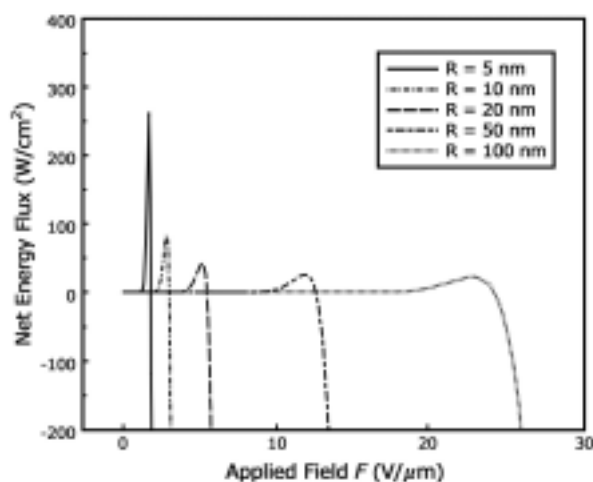
圖二十八：電腦中央處理機(CPU)的散熱需求 (Thermal Specification of AMD Athlon CPU)。

鑽石發射電子時，電流通過會產生熱量，但射出去的電子也會帶走熱量。究竟熱量生成較快還是減少較多呢？這個答案乃視電子射出的難易程度而定。如果電子射出困難，熱量就會積聚使溫度上昇，反之熱量會散失而使溫度下降(見圖二十九)。



圖二十九：以「電子槍陣」發射電子時，若發射電流很大(如槍陣密度很高，槍枝頂端很尖而且功函數很低)，則可使用較低能量的熱源來發電，而且加熱面的溫度也會較低。同樣的道理，以「電子槍陣」來散熱時，電子帶走的熱量會比發射電子所產生的熱量多，因此就有冷卻的效果。

電子射出的難易程度取決於兩大因素，即電場的強化程度與電子射出的阻力(即功函數)。電場越強化或電子射出的阻力越小則電子帶走的熱量就會越多，這樣，散熱面的溫度就會越低。電場的集中程度與電子槍的尖銳度成正比，因此電子槍尖的曲率半徑越小就越容易射出電子。另一方面外加的電場越大，射出的電子會帶走能量較小的電子，而由陰極遞補的電子在較高電場的推動下反而會產生出比電子帶走能量更大的廢熱，其結果是總能量不昇反降，這時的「電子槍陣」乃由冷卻器轉為加熱器(見圖三十)。所以只有在適當的外加電場下才能使能量較大的電子射出，這樣散熱面的溫度才會降低。



圖三十：熱量的改變速率(縱軸)與外加電場的關係。圖示電子槍尖的曲率半徑越小時，散熱面的冷卻效果越好，但外加電場提高時也更容易加熱，所以散熱面的溫度反而會升高。本圖乃依功函數為 1.7 eV 計算(電流密度 10 A/cm<sup>2</sup>，溫度 300 K)。圖示散熱最快的槍尖其半徑為 5 nm，這時散熱速率可高達 250 W/cm<sup>2</sup>。本圖取自 T. S. Fisher, Applied Physics Letters, 2001, 79, 3699-3701。

「鑽石電子槍」經過適當設計後可以當做散熱片，甚至可以成為「冷卻片」、「場散熱片」和「場發電片」的機制相同但電流及熱流的方向卻相反。前者乃以外加電場來吸出電流並帶走熱量；後者則以外加熱流來激出電流而產生電壓。以鑽石「場散熱片」的方法來汲取過剩的廢熱還有附加的好處，即廢熱產生的電流為可用的能量，所以可以用它來吸出更多的熱量，因此這種吸熱的方法效率可以較高。



圖三十一：以「無晶鑽石」或「奈米碳管」散熱的示意。

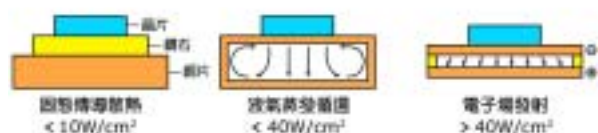
熱量可以輻射、對流及傳導三種方式散佈。輻射只在溫度甚高(> 1000 )時才會變成主要機制(見上述「黑體輻射」)。對流需流體協助，有時要架設複雜的管路，對微小機電設備的散熱來說並不適用，因此對輕薄短小的電子元件來說，傳導散熱將為未來的主流。

把熱流出固體的傳導方式可靠電子的移動(電流)或原子(晶格)的振動(聲子)。金屬的傳熱屬前者，而鑽石的則散熱屬後者。以手觸鐵會覺得冷是鐵中的電子受熱而流向冷端，但電子流經金屬時會遇到阻力，因此電阻越大的金屬，傳熱越慢。傳熱最快的金屬即為最好的導電體，包括銀及銅等。當熱要傳得更快時，只好靠原子的振動。鑽石的剛性最大，所以聲子的頻率最高，也就是說，它的散熱速率最快，在高溫時鑽石散熱會比銀或銅快四倍以上。

要以電子散熱比鑽石的聲子更快，必須加大電流才行。以固體的金屬來傳遞電子時電流會加不上去，因此散熱的速率無法超越鑽石。但若以鑽石場發射的方式來傳遞電子，由於真空沒有電阻，所以電流可以大幅增加。也就是說，以「鑽石電子槍」來散熱時它的速率可以倍數增加，甚至遠遠超越以聲子散熱的鑽石本身。因此鑽石場發射散熱片將可

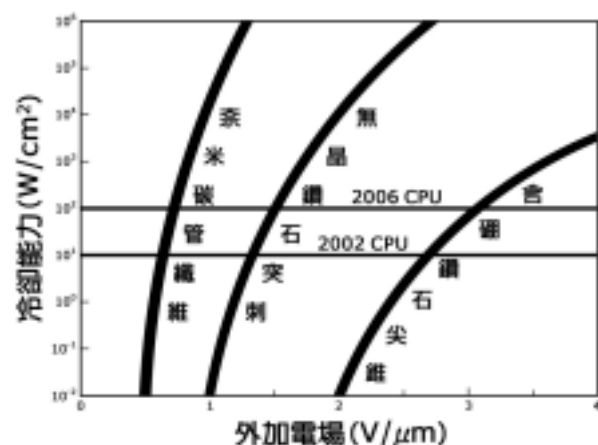


避免晶片過熱，使半導體(或 MEM)的性能更上層樓。



圖三十二：高能晶片三種最先進的散熱方法。圖示以電子場發射發射散熱時體積可以最小而散熱可以最快。

鑽石「場散熱片」的構造相當簡單，但散熱速率卻極快，它甚至可製成超小型的冷凍片，這種突破可大幅躍昇 MEM 的應用範圍。例如手動的紅外線偵測器內有一極敏感的熱能電阻(Bolometer)。以「無晶鑽石」塗佈此元件後即可以加上一個小電池散熱，這樣就會避免元件因過熱而失去功能。相似的應用還包括冷卻 ULSI、Laser Diode，及數位像機的 CMOS 的晶片等。



圖三十三：以不同碳材發射電子所能產生冷卻效果的大致狀況。圖內也標出未來 CPU 散熱的需求。

## 結論

綜上所述，由於機電、IC、光電等元件的越趨微小，傳統的電源(如電池)不僅笨重而且不能持久。另一方面，由於功率集中，晶片的散熱碰到難以克服的瓶頸。以「無晶鑽石」或「奈米碳管」製成奈米電子槍陣來產生電流乃成為突破未來文明困境的兩面刃，使用這把「尚方寶劍」，不僅元件電力供應不虞，廢熱也能順利排除。在「無晶鑽石」及「奈米碳管」發電機或熱泵(Heat Pump)的助陣下，「奈米科技」會有如神助，這樣不僅 ULSI 的進展可以延續「摩爾定律」的氣數，NEM(Nano Electro-Machine)的普及也會豐富「鑽石世紀」的內涵。